

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ OCTÁVIO OLIANI

MAPEAMENTO DA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO RIO IRAÍ POR MEIO
DE OBIA (ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO) E IMAGEM WORLDVIEW II

CURITIBA

2013

LUIZ OCTÁVIO OLIANI

MAPEAMENTO DA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO RIO IRAÍ POR MEIO
DE OBIA (ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO) E IMAGEM WORLDVIEW II

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ OCTÁVIO OLIANI

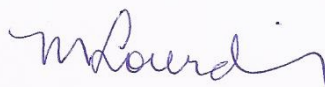
"MAPEAMENTO DA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO RIO IRAÍ POR MEIO DE OBIA (ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO) E IMAGEM WORLDVIEW II "

Dissertação nº 264 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

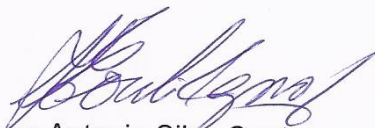
Orientador:



Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes
Departamento de Geomática, UFPR



Profª. Drª. Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo
Universidade Estadual Paulista, UNESP



Prof. Dr. Jorge Antonio Silva Centeno
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 17 de maio de 2013.

RESUMO

Metodologias de monitoramento ambiental têm sido discutidas com grande frequência no que concerne a preservação de grandes corpos de água, sobretudo aqueles que estão localizados em zonas urbanas. As técnicas de processamento digital de imagens de sensores de alta resolução mostram-se como uma alternativa viável ao monitoramento destas grandes áreas de lagos, represas e reservatórios de abastecimento, naturais ou artificiais, podendo gerar informações de qualidade em curto espaço de tempo e em larga escala, tornando-se assim uma ferramenta de apoio ao planejamento e tomada de decisão pelos gestores. Objetiva-se com este trabalho utilizar imagens de alta resolução, com 8 bandas multiespectrais combinadas com índices de vegetação para mapear a região do Reservatório do Iraí, por meio de técnicas de processamento digital de imagens e classificação hierárquica, baseadas em Object Based Image Analysis - OBIA (Análise de Imagem Baseada em Objetos). A metodologia baseou-se nos processos segmentação multirresolução e classificação hierárquica, combinados com índices de vegetação, para caracterizar, tanto o ambiente aquático, quanto o ambiente externo ao reservatório. Com as atividades desenvolvidas durante o projeto proposto, notou-se uma grande potencialidade da utilização de imagens de alta resolução espacial, com diversas bandas multiespectrais para definição de feições de interesse, tanto em ambientes terrestres quanto em ambientes aquáticos, através de algoritmos de segmentação multirresolução e classificação hierárquica contextualizada. O processo realizado gerou resultados satisfatórios e promissores na localização e identificação de diversos tipos de vegetação aquática, podendo ser utilizadas por técnicos como ferramentas complementares ao monitoramento de grandes regiões de reservatórios de abastecimento.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, processamento digital de imagens, segmentação multirresolução, classificação hierárquica, OBIA, WorldView II.

ABSTRACT

Environmental monitoring methodologies have been discussed quite often regarding the preservation of water bodies, especially those that are located in urban environment. The techniques of digital image processing of high resolution sensors show itself as a viable alternative to the monitoring of these large areas of lakes, reservoirs and supply reservoirs, natural or artificial, can generate quality information in a short time and large scale, thus becoming a tool to support planning and decision making by managers. The objective of this study was to use high-resolution images with 8-band multispectral combined with vegetation indices to map the region of the reservoir Iraí, through techniques of digital image processing and hierarchical classification based on Object Based Image Analysis - OBIA (Image Analysis Based on Objects). The methodology was based on processes multiresolution segmentation and hierarchical classification, combined with vegetation indices to characterize both the aquatic environment and the external environment to the reservoir. With the activities undertaken during the proposed project, we noted a large potential use of high spatial resolution, with several multispectral bands to define features of interest, both in terrestrial and in aquatic environments through multiresolution segmentation algorithms and hierarchical classification context. The process performed satisfactory and promising results generated in the location and identification of different types of aquatic vegetation, which can be used by technicians as complementary tools to the monitoring of large areas of supply reservoirs.

Keywords: remote sensing, digital image processing, multiresolution segmentation, hierarchical classification, OBIA, WorldView II.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. FENÔMENO DE REFLEXÃO ESPECULAR.	30
FIGURA 2. FENÔMENO DE REFLEXÃO DIFUSA.	30
FIGURA 3. FENÔMENO DA REFRAÇÃO.	31
FIGURA 4. CURVAS TÍPICAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA, SOLO E VEGETAÇÃO.....	32
FIGURA 5. CURVA DE ABSORTÂNCIA DA ÁGUA.....	33
FIGURA 6. CURVA DE TRANSMITÂNCIA DA ÁGUA.	35
FIGURA 7. CURVAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA PURA E DA ÁGUA TURVA.	36
FIGURA 8. CURVAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA COM E SEM A PRESENÇA DE CLOROFILA.	37
FIGURA 9. REDE HIERÁRQUICA DE OBJETOS	42
FIGURA 10. CARTOGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.	46
FIGURA 11. RESERVATÓRIO DO IRAÍ, VISTA DO MUNICÍPIO DE PINHAIS.	46
FIGURA 12. GRÁFICO DO INTERVALO ESPECTRAL DA BANDA PANCROMÁTICA E DAS BANDAS MULTIESPECTRAIS DO SENSOR WORLDVIEW-2.....	49
FIGURA 13. FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS.....	51
FIGURA 14. RESERVATÓRIO DO IRAÍ - INSTALAÇÕES DA SANEPAR.....	52
FIGURA 15. PONTOS PARA DEMARCAÇÃO DAS CLASSES DE INTERESSE.....	55
FIGURA 16. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 10.	58
FIGURA 17. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 20.	58
FIGURA 18. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 50.	59
FIGURA 19. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 100.	59

FIGURA 20. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	63
FIGURA 21. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO SEMÂNTICA ATRIBUÍDA AO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA APLICADA AO AMBIENTE EXTERNO AO RESERVATÓRIO.	64
FIGURA 22. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO SEMÂNTICA ATRIBUÍDA AO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA APLICADA AO AMBIENTE AQUÁTICO DO RESERVATÓRIO.	65
FIGURA 23. NDVI APLICADO NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ. .	67
FIGURA 24. NDVI - APROXIMAÇÃO DE DUAS REGIÕES DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.....	68
FIGURA 25. NRAVI APLICADO NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.	69
FIGURA 26. NRAVI - APROXIMAÇÃO DE DUAS REGIÕES DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.....	69
FIGURA 27. RAVI APLICADO NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ...	70
FIGURA 28. RAVI - APROXIMAÇÃO DE DUAS REGIÕES DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.....	71
FIGURA 29. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. RAVI (ESQUERDA), NRAVI (MEIO) E NDVI (DIREITA).	72
FIGURA 30. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. RAVI (ESQUERDA), NRAVI (MEIO) E NDVI (DIREITA).	72
FIGURA 31. GRÁFICO DOS VALORES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS CLASSES DEFINIDAS.....	73
FIGURA 32. COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS NAS OITO BANDAS REFERENTES ÀS CLASSES ÁGUA E NÃO ÁGUA NO NÍVEL DE ESCALA 100.	75
FIGURA 33. RESULTADO ELABORADO PARA REPRESENTAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO NO NÍVEL DE ESCALA 100.	76
FIGURA 34. TELA DA COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS NAS OITO BANDAS REFERENTES ÀS CLASSES VEGETAÇÃO E NÃO VEGETAÇÃO NO NÍVEL 50.....	77

FIGURA 35. TELA DE COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS DOS ÍNDICES RAVI, NRAVI E NDVI REFERENTES ÀS CLASSES VEGETAÇÃO E NÃO VEGETAÇÃO NO NÍVEL 50.	78
FIGURA 36. RESULTADO GERADO COM REPRESENTAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE ESCALA 50.	79
FIGURA 37. TELA DA COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS NAS OITO BANDAS REFERENTES ÀS CLASSES ÁREA URBANIZADA E SOLO EXPOSTO NO NÍVEL 20.	80
FIGURA 38. RESULTADO GERADO PARA REPRESENTAÇÃO DO AMBIENTE EXTERNO AO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.	82
FIGURA 39. TELA DE COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS DOS ÍNDICES RAVI, NRAVI E NDVI REFERENTES ÀS CLASSES MACRÓFITAS E ÁGUA TURVA NO NÍVEL 10.	83
FIGURA 40. RESULTADO GERADO PARA REPRESENTAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTA AQUÁTICO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. DIFERENCIAÇÃO ENTRE LAGOS E RESERVATÓRIOS.....	23
TABELA 2. IMPACTOS CAUSADOS NOS RECURSOS HÍDRICOS PELAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS.....	26
TABELA 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO ORBITAL WORLDVIEW-2.	49
TABELA 4. INTERVALO ESPECTRAL DAS BANDAS DISPONIBILIZADAS PELO SENSOR WORLDVIEW-2.	50
TABELA 5. TABELA COM A RELAÇÃO ENTRE A LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E A CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES.	54
TABELA 6. MATRIZ DE ERROS PARA CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE EXTERNO AO RESERVATÓRIO.	85
TABELA 7. MATRIZ DE ERROS PARA A CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE AQUÁTICO DO RESERVATÓRIO.....	85
TABELA 8. COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA OBTIDOS PARA AS DUAS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS COM A UTILIZAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ADAPTADOS.....	86
TABELA 9. COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA OBTIDOS PARA AS DUAS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS SEM A UTILIZAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ADAPTADOS.....	86

LISTA DE SIGLAS

APA	–	Área de Preservação Ambiental
APP	–	Área de Preservação Permanente
COMEC	–	Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba
CONAMA	–	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETA	–	Estações de Tratamento de Água
IAP	–	Instituto Ambiental do Paraná
IET	–	Índice de Estado Trófico
MMA	–	Ministério do Meio Ambiente
NDVI	–	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
NRAVI	–	Normalized Ratio Aquatic Vegetation Index
RAVI	–	Ratio Aquatic Vegetation Index
SANEPAR	–	Companhia de Saneamento do Paraná
SEMA	–	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná
SISNAMA	–	Sistema Nacional do Meio Ambiente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVO GERAL	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. JUSTIFICATIVA	17
4. REFERENCIAL TEÓRICO	19
4.1. MONITORAMENTO DE AMBIENTES AQUÁTICOS	19
4.1.1. Parâmetros Indicadores da Qualidade da Água	20
4.1.2. A Qualidade da Água em Reservatórios	22
4.1.3. Atividades Humanas e a Alteração da Qualidade da Água	25
4.2. EUTROFIZAÇÃO	27
4.3. PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DE IMAGENS.....	29
4.3.1. Comportamento Espectral de Alvos	29
4.3.2. Índices de Vegetação	37
4.3.3. Segmentação de Imagens Baseada em Objeto	39
4.3.4. Classificação de Imagens Baseada em Objeto	42
5. ÁREA DE ESTUDO	45
5.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS	45
5.2. SOBRE O RESERVATÓRIO DO IRAÍ	46
6. MATERIAIS	48
6.1. IMAGENS WORLDVIEW-2	48
7. METODOLOGIA	51
7.1. FOTOINTERPRETAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO	51
7.1.1. Visita ao Reservatório do Iraí	51
7.1.2. Definição das Classes	53
7.2. SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM.....	57
7.3. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	60
7.3.1. NDVI.....	61
7.3.2. NRAVI	61
7.3.3. RAVI.....	61

7.4. CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DA IMAGEM	62
7.4.1. Avaliação da Qualidade Temática da Classificação	65
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
8.1. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	67
8.1.1. NDVI.....	67
8.1.2. NRAVI	68
8.1.3. RAVI	70
8.1.4. Comparação entre os Índices de Vegetação.....	71
8.2. CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DA IMAGEM	73
8.2.1. Classificação do Ambiente Externo ao Reservatório.....	74
8.2.1.1. Classificação Nível de Escala 100	74
8.2.1.2. Classificação Nível de Escala 50	76
8.2.1.3. Classificação Nível de Escala 20	79
8.2.2. Classificação do Ambiente Aquático do Reservatório	82
8.3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE TEMÁTICA DA CLASSIFICAÇÃO.....	84
9. CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

1. INTRODUÇÃO

Questões ambientais vêm sendo debatidas com grande frequência, tanto por parte dos governantes, quanto da sociedade civil organizada e também da academia, tornando-se prioridade em todos os assuntos, que de alguma forma, atingem a sociedade, como, por exemplo, a destinação do lixo, a execução de grandes obras de infraestrutura e o crescimento dos grandes centros urbanos.

A busca contínua pela melhoria na qualidade de vida fica evidenciada, atualmente, pela preocupação da sociedade com a preservação do meio em que vivemos, fato este que se reflete nas mais diferentes formas, desde a elaboração de políticas públicas de gestão sustentável, por parte dos governantes, até a separação do lixo e o cuidado com o desperdício de água e luz, por parte de uma dona de casa.

Sabe-se que as consequências geradas pelo processo de urbanização influenciam diretamente nos aspectos ambientais, alterando o uso da terra, a fauna, a vegetação e as características hidrológicas de cada região. Assim, para uma sociedade se desenvolver de forma sustentável é necessário à integração de diversos fatores econômicos, sociais e ambientais, dentre os quais se encontra um elemento que é objeto de estudos, discussões e polêmica em todo o mundo, além de ser responsável por manter as mais diversas formas de vida na Terra: **a água**.

Abastecer grandes centros urbanos, como é o caso de Curitiba e sua Região Metropolitana, com água de qualidade e própria para o consumo e gerenciar o sistema de coleta e tratamento de esgoto é um desafio para os órgãos responsáveis, pois, qualquer ação ou incidente relacionado ao sistema de saneamento básico ou a rede de drenagem, afetam a qualidade da água distribuída e a bacia hidrográfica em que estão inseridas. Outra questão inerente ao processo é como e onde armazenar uma grande quantidade de água para alimentar os grandes sistemas de abastecimentos e desta forma, uma das alternativas encontradas foi à construção de grandes reservatórios artificiais.

Dentre os reservatórios de abastecimento existentes na Região Metropolitana de Curitiba, um dos mais importantes e que possui maior extensão e capacidade de armazenamento é o Reservatório do Iraí, localizado entre os municípios de Pinhais, Piraquara e Quatro Barras. Porém, estes grandes reservatórios são afetados por diversas questões que influenciam seu funcionamento e a qualidade de suas águas, gerando assim uma série de fenômenos que necessitam ser monitorados e controlados por parte dos responsáveis (ANDREOLI et. al., 2005).

Dentre estes, o fenômeno da eutrofização está cada vez mais presente no nosso cotidiano, pois, com a evolução da indústria, do agronegócio e da urbanização sem planejamento, o que provoca um crescimento demográfico desordenado em regiões de proteção ambiental, faz com que os níveis dos nutrientes existentes na água sofram alterações, direta ou indiretamente, alterando assim sua concentração nos reservatórios e, conseqüentemente, influenciando a qualidade da água nos mesmos (ANDREOLI et. al., 2005).

Graças ao desenvolvimento tecnológico de sensores de alta resolução espacial e espectral (por exemplo, sensores WorldView-2 e GeoEye), o sensoriamento remoto torna-se uma ferramenta útil para o monitoramento de uma variedade de questões ambientais em regiões contempladas por grandes obras, como o caso de barragens, lagos, diques e reservatórios de abastecimento público, pois através destas imagens, é possível extrair informações sobre tipos de vegetação, desmatamentos, cursos hídricos, bacias hidrográficas, urbanização, áreas influenciadas por grandes obras, entre outros.

Desta forma, vislumbra-se a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, através de imagens orbitais de alta resolução espacial, como uma alternativa ao monitoramento das características ambientais existentes nas regiões contempladas por grandes reservatórios de abastecimento, pois, estas influenciam diretamente nos parâmetros de qualidade da água e são informações necessárias aos gestores para elaboração dos planos de manutenção destes.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Mapear a região do Reservatório do Iraí, por meio de técnicas de processamento digital de imagens e classificação hierárquica, baseadas em *Object Based Image Analysis* - OBIA (Análise de Imagem Baseada em Objetos), de imagens orbitais multiespectrais de alta resolução espacial.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o reconhecimento do ambiente de estudos por meio de visitas técnicas a campo;
- Definir as classes de interesse no ambiente externo ao reservatório;
- Diagnosticar os diferentes tipos de vegetação aquática existentes no Reservatório do Iraí;
- Adaptar os Índices de Vegetação NDVI, NRAVI e RAVI para as faixas espectrais disponíveis e observar suas aplicabilidades na detecção de vegetações aquáticas;
- Avaliar a classificação hierárquica da imagem utilizando os índices de vegetação adaptados e os parâmetros definidos anteriormente.
- Elaborar mapas temáticos referentes à classificação hierárquica realizada tanto no ambiente externo, quanto no ambiente aquático, do Reservatório do Iraí, observando sua qualidade.

3. JUSTIFICATIVA

Atualmente os procedimentos utilizados para monitoramento das questões ambientais, como, por exemplo, o nível de estado trófico em reservatórios são custosos e demorados, pois necessitam de análises laboratoriais de amostras de água coletadas *in loco*. Isto faz com que reservatórios que cobrem grandes extensões de áreas sejam monitorados, em média, por um ou dois pontos de coleta de água.

Isto pode ser observado no Reservatório do Irai, local escolhido para o desenvolvimento das atividades propostas nesse projeto, onde o Instituto Ambiental do Paraná – IAP mantém apenas um ponto de monitoramento, com análises laboratoriais, as quais visam estimar os níveis de concentração de clorofila, sedimentos em suspensão, metais e nutrientes. Este ponto está localizado ao sul do reservatório, através do qual, juntamente com as vistorias e observações dos técnicos, analisa a qualidade da água para toda a extensão do reservatório. Análises estas que irão apontar a necessidade ou não de intervenções no reservatório, como, por exemplo, a retirada e descarte correto da vegetação aquática ou sedimentos.

As técnicas de sensoriamento remoto mostram-se como uma alternativa viável para o monitoramento de grandes regiões de lagos, represas e reservatórios, naturais ou artificiais, pois pode gerar informações em larga escala e curto espaço de tempo, como ferramenta de auxílio ao planejamento e tomada de decisão por parte dos órgãos responsáveis.

Produtos disponíveis no mercado, como é caso das imagens providas do satélite WorldView-2, com 8 bandas multiespectrais combinadas com técnicas de análise de imagens baseada em objeto, com as quais dispõe-se de uma grande quantidade de propriedades que permitem a caracterização e análises das regiões de interesse de forma mais eficiente, ampliam as possibilidades de investigação ambiental, a exemplo do monitoramento de diversos tipos de vegetação aquática e características existentes nas regiões que possuem reservatórios de grande extensão, tema deste trabalho. Imagens de alta resolução espacial, tomadas com sensores multiespectrais, disponibilizam uma grande quantidade de dados agregados, os quais,

manipulados de forma correta, podem gerar informações para aplicações em estudos específicos nas mais diversas áreas.

Atualmente, existem poucas referências em relação ao desenvolvimento de estudos utilizando técnicas de OBIA aplicadas em imagens WorldView-2, em questões relacionadas à análise e mapeamento de características da água em grandes reservatórios de abastecimento localizados em território nacional. Sendo assim, determinou-se uma área de estudos que possuísse uma grande diversidade de características ambientais, de forma a possibilitar uma avaliação do uso destas imagens como ferramenta alternativa à geração de informações confiáveis para o monitoramento ambiental nas regiões ocupadas por grandes reservatórios.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. MONITORAMENTO DE AMBIENTES AQUÁTICOS

O gerenciamento da qualidade da água é uma questão complexa em razão da própria natureza dinâmica destes ecossistemas e das pressões do homem e de fenômenos naturais que influenciam significativamente os processos físicos, químicos e biológicos destes ecossistemas (BOLLMANN et. al., 2005).

O monitoramento qualitativo das águas em reservatórios passa fundamentalmente pelo conhecimento das cargas de poluentes efluentes, geradas nas bacias hidrográficas contribuintes, e que se traduzem basicamente como pressões exercidas pelas diferentes atividades socioeconômicas desenvolvidas no território sobre os recursos hídricos. As formas de uso associadas às condições naturais das bacias hidrográficas (geomorfologia, relevo, ventos e precipitação), determinam a qualidade dos recursos hídricos, e, conseqüentemente, o impacto na saúde pública e nos ecossistemas.

O monitoramento contínuo deve ser visto como um processo essencial que diz respeito à implementação e manutenção de instrumentos de gestão aplicados em reservatórios de abastecimentos públicos, pois geram informações estratégicas e possibilitam o acompanhamento efetivo das ações realizadas. Desta forma, os técnicos capacitam-se para desenvolver diretrizes, programas e atividades de manutenção adequadas que visem a melhoria da qualidade da água armazenada nesses reservatórios, e assim, contribuindo de forma significativa ao sistema de abastecimento de cada região (BOLLMANN et. al., 2005).

4.1.1. Parâmetros Indicadores da Qualidade da Água

A água encontrada em sua forma natural possui diversas substâncias em concentrações que variam em função de diversos fatores e condições provenientes do meio em que estão inseridas. Em decorrência disto são necessários indicadores físicos, químicos e biológicos para a avaliação de sua qualidade, os quais são determinados por meio de análises laboratoriais gerados a partir de amostras de água coletadas, segundo padronizações técnicas existentes, que variam de acordo com cada fator a ser examinado.

A cor, a turbidez, o sabor e o odor são indicadores físicos que variam diretamente sob a influência da presença de poluentes na água. Esses indicadores podem atingir níveis nos quais o consumo humano fica impossibilitado.

A presença excessiva de microrganismos patogênicos, como, por exemplo, bactérias e vírus, são alguns dos indicadores biológicos negativos com relação à qualidade da água. Estes indicadores podem ser analisados através da quantidade de coliformes fecais, existentes nos dejetos animais, por exemplo, que consumidos em grande quantidade podem causar riscos à saúde (BRAGA et. al., 2002).

A água para consumo deve apresentar condições adequadas quanto aos padrões de qualidade bacteriológica e físico-química (de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde nº 518, de 25 de março de 2004) de modo que não apresente riscos à saúde pública. Já os padrões para qualidade das águas naturais e seus múltiplos usos são considerados na Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 20, de 18 de junho de 1986.

Os problemas de qualidade de água ocorrem pela interação entre componentes internos e externos ao sistema de recursos hídricos. Assim, a condição socioeconômica das comunidades vizinhas, a posição geográfica do corpo hídrico, a geomorfologia da bacia, entre outros fatores, são aspectos que devem ser considerados no momento das análises. Estes problemas são determinados em grande parte pelas atividades antrópicas observadas no âmbito das bacias, que em geral, são descritas do ponto de vista ecossistêmico como sendo dissipadoras de energia e ruídos, bem como de resíduos sólidos,

líquidos e gasosos, que tem desafiado os princípios mais elementares de equilíbrio, homeostase e autossuficiência ambiental (DREW, 1983).

Em razão dos fatores apresentados, verifica-se a necessidade de identificar e controlar as fontes poluidoras, tanto as pontuais (como, por exemplo, o lançamento de efluentes domésticos e industriais) quanto às difusas (como, por exemplo, a prática de atividades agrícolas e as que acarretam na erosão do solo).

A água possui características químicas e físicas bastante especiais, pois é um dos raros compostos que se apresentam na forma líquida em condições naturais, apresenta grande estabilidade, alta densidade, viscosidade e tensão superficial e é, ainda, um solvente universal. Pelo seu poder de diluir e solubilizar praticamente todas as substâncias, a água desempenha um importante papel como elemento de ligação entre os compartimentos ambientais. Tudo o que ocorre na área de drenagem será refletido, direto ou indiretamente, na qualidade das águas do seu corpo hídrico: esgotos sem tratamento aumentam o risco de doenças transmitidas pela água, efluentes industriais e orgânicos aumentam o risco toxicológico e reduzem o oxigênio dissolvido gerando contaminação química, a erosão aumenta a turbidez e causa a poluição das águas e o assoreamento dos rios, os defensivos utilizados na agricultura podem ser carregados e causar problemas à fauna aquática e às pessoas que utilizam aquela mesma água, rio abaixo (BOLLMANN et. al., 2005).

Segundo BOLLMANN et. al. (2005), para subsidiar as ações de controle da qualidade nos mananciais e para auxiliar as tomadas de decisões, o monitoramento da qualidade das águas é uma ferramenta fundamental. Os parâmetros frequentemente utilizados para realizar este monitoramento em lagos e reservatórios artificiais podem ser agrupados em:

- **Físicos:** luz solar, temperatura, turbidez, sedimentos e cor;
- **Químicos:** oxigênio dissolvido, salinidade, potencial hidrogeniônico, alcalinidade, carbono, teor de nutrientes (principalmente compostos de nitrogênio e fósforo), metais pesados e sólidos;
- **Bióticos:** as principais comunidades bióticas podem ser apresentadas como sendo o Fitoplâncton, Zooplâncton, Ictiofauna, Crustáceos e Invertebrados Aquáticos;

- **Hidrológicos:** agrupados em área superficial (que afeta uma série de importantes relações, dentre as quais pode-se citar a razão entre a área superficial e o seu perímetro, a porcentagem do volume total de água que é influenciada pela luz solar e a razão da área da bacia com a área do lago), descargas líquidas (que influem no padrão de circulação da água nos corpos de água), o tempo de retenção hídrico, a flutuação do nível da água no reservatório, a profundidade e a continuidade do seu espelho d'água;

- **Geomorfológicos:** tipo e a extensão da cobertura vegetal da bacia, o tipo de solo e material de origem geológica, área e localização de aglomerados urbanos, existência de matas ciliar e ripária e a evolução da paisagem.

Dentre os parâmetros de monitoramento da qualidade da água apresentados anteriormente, alguns podem ser obtidos remotamente, sem a presença dos técnicos no local, por meio de técnicas avançadas de coleta computadorizada, sensores de medição e sensores de imageamento orbitais.

As imagens fornecidas por estes sensores propiciam uma visão em larga escala da região onde grandes corpos aquáticos estão inseridos, permitindo, por exemplo, a determinação de alguns parâmetros geomorfológicos como: delimitação da bacia hidrográfica, tipo e extensão da cobertura vegetal da região, localização de aglomerados urbanos e construções existentes em locais impróprios e monitoramento da evolução da paisagem com o passar dos anos. Também podem ser feitas avaliações pontuais dos parâmetros existentes nas áreas cobertas por água, como por exemplo, a determinação e localização de comunidades bióticas que apresentem a componente clorofila, presença de sedimentos, nível de transparência da água e cor.

4.1.2. A Qualidade da Água em Reservatórios

COUTO (2012) define os reservatórios como sendo “lagos feitos pelo homem, normalmente através do barramento de um rio, com a finalidade de gerar energia elétrica, irrigação, abastecimento de água, entre outros fins”. Esses reservatórios artificiais ocupam hoje cerca de 7.500 km³ de águas

represadas em todo o planeta. A diferenciação entre lagos e reservatórios pode ser feita também considerando uma série de fatores, apresentados na TABELA 1.

TABELA 1. DIFERENCIAÇÃO ENTRE LAGOS E RESERVATÓRIOS.

Característica	Lago	Reservatório
Área de drenagem	Menor	Maior
Tempo de retenção hídrico	Longo (anos)	Curto (dias)
Seção transversal	Formato de U	Formato de V
Flutuação do nível da água	Menor (natural)	Maior (comportas)
Hidrodinâmica	Mais regular (natural)	Variável (comportas)
Pulsação	Natural	Operado pelo homem
Aproveitamento hídrico	Raro	Comum
Origem	Natural	Antrópica
Idade	Velho (=> Pleistoceno)	Novo (<50 anos)
Envelhecimento	Lento	Rápido
Local de formação	Depressões	Vales de rios
Posição relativa à bacia	Central	Marginal
Formato	Mais regular (circular)	Dendrítico (triangular)
Profundidade máxima	Perto do centro	Perto da barragem
Sedimentos do fundo	Autóctones	Importados
Gradiente longitudinal	Baixo: formação eólica	Médio: corrente hidráulica
Profundidade de descarga	Superficial	Profunda

FONTE: ADAPTADO DE COUTO (2012).

Do ponto de vista dos parâmetros físicos, a radiação solar é um dos mais importantes para a avaliação das questões ligadas à eutrofização. Ao penetrar na coluna d'água, a luz sofre profundas alterações, tanto na sua intensidade como na sua qualidade espectral. Estas alterações dependem basicamente das concentrações de material dissolvidos e em suspensão, provocando absorção da luz ou sua dispersão no meio líquido.

Variações acentuadas na transparência da água de um lago ou reservatório quase sempre estão associadas às atividades de uso da terra em sua bacia de contribuição. Uma vez que a fotossíntese depende fundamentalmente da luz, mudanças significativas da sua penetração na coluna d'água também produziram uma variedade de efeitos (diretos e indiretos) químicos e biológicos. Como resultado da variabilidade destes

interferentes, a transparência da água pode variar de alguns poucos centímetros a dezenas de metros de profundidade.

Pode-se considerar três caminhos para a deterioração da qualidade das águas armazenadas em lagos ou reservatórios artificiais, a partir de elementos orgânicos e inorgânicos conservados na área inundada ou inseridos durante ou após seu processo de enchimento dos mesmos. Estes caminhos são:

- Carregamento de nutrientes (fósforo e nitrogênio) das áreas urbanizadas através de esgotos lançados nos rios com ou sem tratamento parcial. O carregamento de nutrientes do solo agrícola pelas enxurradas tem desempenhado um papel menos intenso, mas nem por isso menos importante;
- Transporte de sedimentos (areia, silte e argila) da área de drenagem da bacia hidrográfica motivada pelas condições particulares de erosão potencial do solo quando ocupado e decomposição de matéria orgânica de plantas e animais (algas, plâncton, entre outros) existentes no próprio reservatório;
- Introdução de produtos tóxicos (pesticidas e metais pesados) organolépticos (clorofenóis) e organismos patogênicos através da atmosfera, dos esgotos residenciais e industriais e das precipitações pluviométricas (ácido sulfúrico, mercúrio, entre outros).

A utilização do reservatório para este fim pode ser perfeitamente conciliada com a navegação ou prática de esportes aquáticos, e também com a produção de energia hidrelétrica, mas pode apresentar sérios inconvenientes ao uso da água para abastecimento público. Isto ocorre, pois as águas destinadas para ao abastecimento (água potável) devem ser, tanto quanto possível, isentas de matéria orgânica sujeita a decomposição e também pobres de plâncton, uma vez que este poderia causar transtornos ao tratamento ou interferir diretamente na qualidade da água, por produzir sabor, odor, e até mesmo substâncias tóxicas ou provocadoras de distúrbios gastrointestinais (COUTO, 2012).

4.1.3. Atividades Humanas e a Alteração da Qualidade da Água

Segundo BOLLMANN et. al. (2005), a contaminação das águas superficiais pode ter várias origens, sendo os principais poluentes que representam riscos apresentados a seguir:

- **Sólidos em suspensão de dissolvidos:** transportados para os corpos hídricos pelo escoamento superficial urbano e rural, aumentando a turbidez das águas;
- **Material orgânico:** proveniente de atividades rurais, industriais e urbanas, pontuais ou difusas, reduzindo a disponibilidade do oxigênio dissolvido para a biota do meio aquático;
- **Nutrientes:** principalmente nitrogênio e fósforo, promovendo um rápido e intenso crescimento na produção primária dos reservatórios e outros problemas associados;
- **Metais pesados, poluentes orgânicos e outras substâncias perigosas:** que acumulam nos sedimentos e na biota do ecossistema;
- **Bactérias e vírus:** potencialmente causadoras de doenças.

Segundo BOLLMANN et. al. (2005), a alteração no nível da água dos reservatórios, motivada pelo seu consumo em atividades humanas, e a consequente diminuição do seu volume hídrico deve ser também considerada. A flutuação do nível da água pode ser um fenômeno natural ou sazonal (em função da variabilidade natural do ciclo hidrológico afetando a relação entre as vazões de entrada e saída bem como a evaporação) ou artificial, ditado pelas manobras de abertura e fechamento das suas comportas e pela maior ou menor demanda de água necessária às atividades humanas. Essa flutuação interfere na área do reservatório, no volume remanescente, na profundidade média, na penetração da luz solar e, nos casos extremos, no revolvimento do lodo do fundo pelas ondas e pelas embarcações, prejudicando a biota aquática.

A TABELA 2 apresenta os usos antrópicos que exercem grande impacto sobre os recursos hídricos e, que se não tratados da maneira adequada, influenciam negativamente na qualidade da água da bacia hidrográfica em questão.

TABELA 2. IMPACTOS CAUSADOS NOS RECURSOS HÍDRICOS PELAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS.

Atividade	Impacto
Desflorestamento	Aumento da carga de particulados, nutrientes e poluentes; Redução da recarga dos aquíferos; Alteração do ciclo hidrológico.
Mineração	Aumento da carga de particulados e nutrientes associados
Obras de transporte (ferrovias e rodovias)	Grandes alterações em várzeas, baixadas e cursos de água; Incremento da erosão; Incremento do escoamento superficial.
Reservatórios	Interrompe a inundação natural de várzeas e baixadas; Afetam consideravelmente quantidade e qualidade das águas.
Esgotos / resíduos sólidos	Alteração na qualidade físico-químico; Alteração na cadeia alimentar de rios, várzeas e baixios alagadiços.
Crescimento urbano	Selamento do solo alterando o ciclo hidrológico das bacias; Produção de esgotos e resíduos sólidos; Ocupação de fundos de vale; Aumento da demanda de água (retirada); Erosão urbana: sedimentos, turbidez, nutrientes, etc.
Agricultura	Lixiviação e erosão são responsáveis por grande parte da carga de nutrientes nos corpos hídricos; Dejetos; Poluição do solo, água e sedimentos por agrotóxicos; Sedimentos, particulados e sólidos em suspensão transportado pela erosão; Redução da capacidade de retenção de água do solo.
Irrigação	Retirada de água Aumento da lixiviação de nutrientes Aumento da erosão
Recreação e turismo	Disposição inadequada do lixo Degradação ambiental
Hidroviás e navegação	Alteração do regime natural dos corpos hídricos, diminuindo ou aumentando a velocidade do fluxo, perturbando o leito do fundo e causando erosão nas margens.
Destruição das várzeas	Redução da capacidade hídrica local, aumento da carga de poluentes aos córregos.
Retiradas de água	Aumenta a concentração de elementos no meio.
Poluição atmosférica	Particulados, compostos orgânicos e nutrientes podem ser transferidos da atmosfera para os reservatórios através das precipitações; Acidificação.

Indústrias	Efluentes contaminados; Resíduos sólidos.
------------	--

FONTE: ADAPTADO DE TUNDISI (2000).

4.2. EUTROFIZAÇÃO

A eutrofização das águas significa seu enriquecimento por nutrientes, e leva a uma progressiva degradação de sua qualidade, especificamente em lagos, devido ao crescimento maciço de algas, o que repercute sobre todo o metabolismo do corpo de água afetado. Em função da eutrofização, muitos lagos em todo o mundo já se encontram seriamente afetados, perdendo sua qualidade cênica, seu potencial recreacional e de forma geral seu valor econômico, tanto para uso no abastecimento doméstico quanto para o uso industrial. Reservatórios artificiais e rios também estão ameaçados. Dentre os nutrientes responsáveis pelo enriquecimento das águas, nitrogênio e fósforo parecem ser os mais importantes. (XAVIER et. al. apud VOLENWEIDER, 1968).

A trofia de um lago refere-se à quantidade de matéria orgânica existente no ambiente ou que aporta a ele por unidade de tempo. Assim, a trofia é a expressão do efeito combinado do suprimento de matéria orgânica em um lago a partir de sua produção autotrófica e de fontes alóctones. Com base nesta definição, um ambiente seria considerado pouco produtivo (oligotrófico) quando a quantidade de matéria orgânica fosse suficiente apenas para manter um baixo nível de produção autotrófica. Assim, a eutrofização causa um desequilíbrio no ecossistema aquático que altera vários atributos físicos, químicos e biológicos. Mudanças na estrutura das comunidades aquáticas tais como na riqueza de espécies, equitatividade, dominância e abundância podem levar a exclusão de algumas espécies e a um elevado crescimento populacional de outras (XAVIER et. al. apud WATSON et. al., 1997).

A eutrofização de corpos de água pode ser um processo natural, também conhecido como envelhecimento de lagos, ou um processo artificial provocado pela ação antrópica. Devido ao aumento expressivo da poluição

ambiental ocorrido nas últimas décadas, a eutrofização vem recebendo maior atenção por parte da comunidade científica, órgãos de controle ambiental, concessionárias de energia e saneamento, organizações não governamentais e pela população em geral. Isto decorre da necessidade do controle do processo de eutrofização, como forma de garantir usos múltiplos para os corpos de água, especialmente em regiões onde a disponibilidade hídrica é baixa ou onde a susceptibilidade à erosão é elevada. A degradação, gerada pela eutrofização, pode comprometer ou mesmo inviabilizar seu uso tanto para abastecimento público como para outras atividades humanas e em especial para preservação de comunidades aquáticas (XAVIER et. al., 2005).

O principal fator que influencia o nível de eutrofização de lagos ou reservatórios, como apresentado, é o crescimento desordenado de alguma espécie de algas, as quais possuem uma característica em comum, a presença de clorofila, componente que, devido as suas propriedades espectrais, pode ser detectada por algumas bandas de sensores multiespectrais e realçada com a aplicação de alguns índices de vegetação específicos.

Esta comunidade de algas pode ser definida como aquela composta por organismos procariontes e eucariontes foto-autótrofos portadores de clorofila, suspensos na coluna de água e que não apresentam locomoção suficiente para vencer os movimentos da água. É importante ressaltar que estes organismos, embora microscópicos, possuem densidade ligeiramente superior a da água e, por este motivo, surgiram adaptações que impedem ou reduzem seu afundamento ou que, mesmo após afundarem, permitem à célula sobreviver no escuro. Em geral o fitoplâncton está incluído em duas classes de tamanho: nanofitoplâncton (2-20nm) e microfitoplâncton (20-200nm), porém podem existir espécies maiores (FERNANDES et. al., 2005).

FERNANDES et. al. (2005) afirma também que a existência de diferentes tipos de clorofila e pigmentos acessórios capacita o aparato fotossintético a captar a luz no espectro do visível compreendido aproximadamente entre 400nm e 700nm, fazendo com que estes níveis variem de acordo com a profundidade, pois a distribuição vertical das espécies está bastante relacionada com a penetração de luz na água e sua atenuação vertical.

4.3. PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE DE IMAGENS

4.3.1. Comportamento Espectral de Alvos

A adequada interpretação de uma imagem depende do conhecimento da interação entre a energia eletromagnética e os objetos existentes na superfície da Terra, ou seja, do comportamento espectral dos alvos.

A irradiância, que é o fluxo incidente sobre uma superfície por unidade de área, e que interage com os elementos na superfície terrestre, é alterada devido à combinação dos efeitos de absorção, espalhamento e transmissão, em proporções que dependem das características da superfície. Por isso, cada alvo tem um comportamento distinto. O efeito de absorção ocorre quando a radiação eletromagnética incidente sobre o alvo é transformada em outra forma de energia, como o calor. Quanto ao espalhamento, é a mudança de direção da radiação através do meio por refração, reflexão e difração. Estes efeitos dependem basicamente do comprimento de onda da energia.

O fenômeno da reflexão ocorre quando os raios que incidem sobre uma superfície voltam para o meio no qual ocorreu a incidência. Quando os raios são refletidos em uma única direção, ou seja, eles são paralelos entre si, denomina-se de reflexão especular (FIGURA 1). Esse tipo de reflexão ocorre, por exemplo, na água parada de um lago. Quando os raios são refletidos em todas as direções, denomina-se reflexão difusa (FIGURA 2).

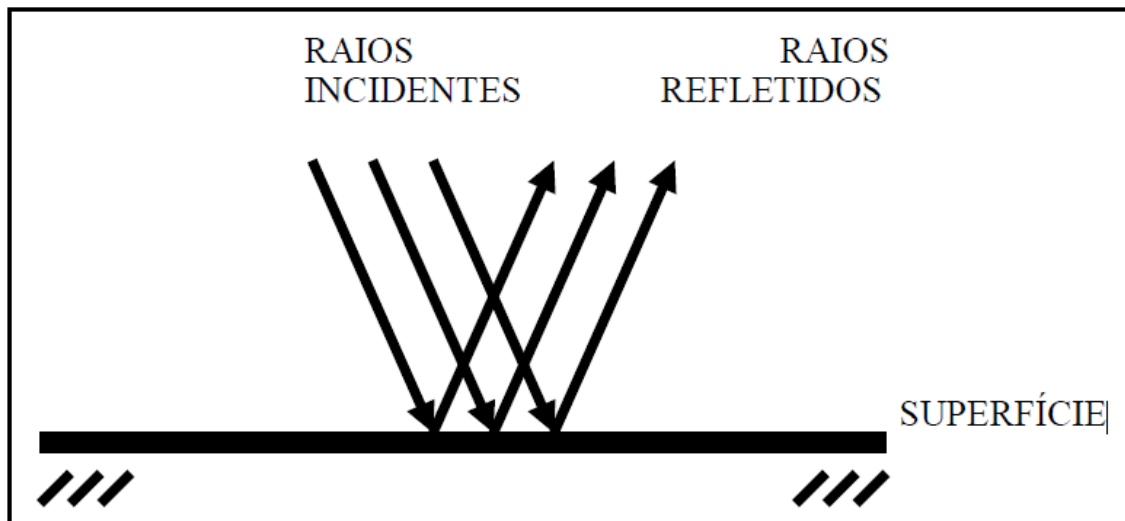


FIGURA 1. FENÔMENO DE REFLEXÃO ESPECULAR.
 FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978).

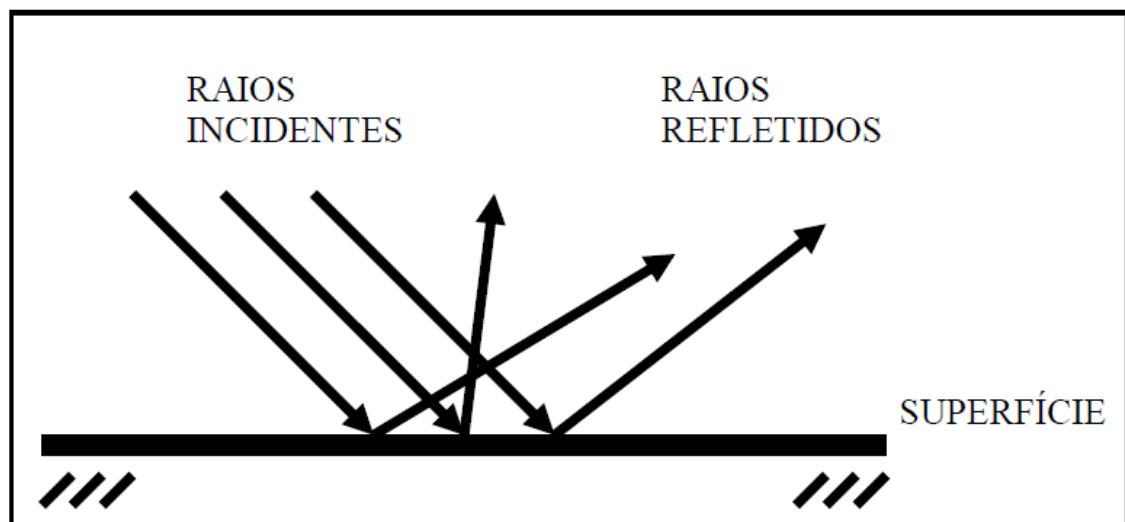


FIGURA 2. FENÔMENO DE REFLEXÃO DIFUSA.
 FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978).

A maior parte das coberturas terrestres tende a comportar-se de modo intermediário quanto à reflexão, em função de suas características e do comprimento de onda em que se está observando. No espectro visível, por exemplo, o solo e a água parada apresentam um caráter quase especular, enquanto nos outros tipos de cobertura predomina o comportamento difuso.

O fenômeno da refração (FIGURA 3) ocorre devido a um desvio que a luz sofre quando passa de um meio para outro de índice de refração diferente. Isto pode ocorrer, por exemplo, quando um feixe de luz passa do ar para a água.

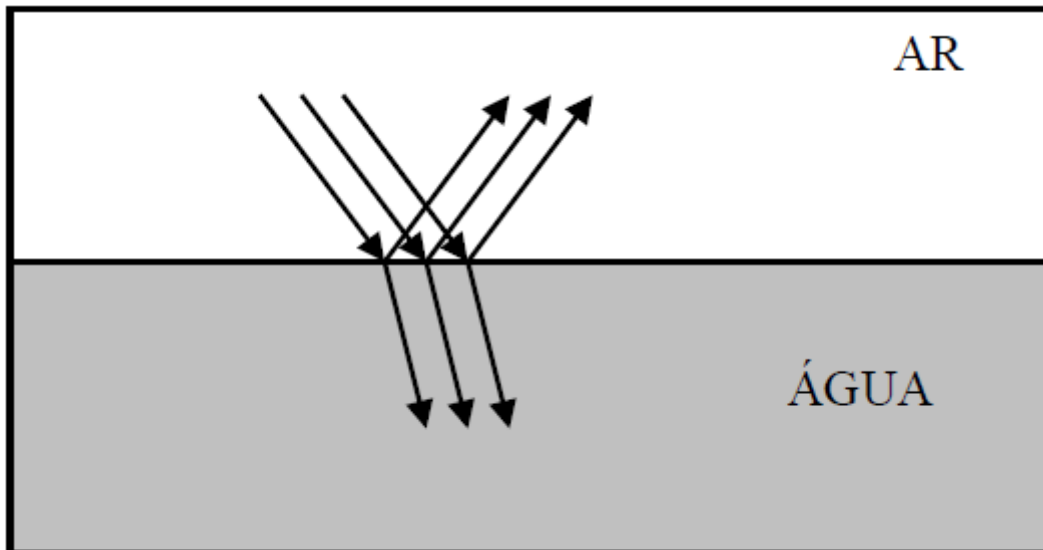


FIGURA 3. FENÔMENO DA REFRAÇÃO.
 FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978).

O comportamento de uma cobertura no espectro visível está sujeito então a alguns fatores que alteram a resposta à radiação, sendo eles (CHUVIECO, 1990, p. 61):

- Ângulo de iluminação solar;
- Modificações que o relevo introduz no ângulo de iluminação;
- Influência da atmosfera, principalmente quanto à dispersão em alguns comprimentos de onda;
- Variações do meio ambiente na cobertura (associação com outras superfícies, homogeneidade, estadas fenólicas), e;
- Ângulo de observação, relacionado com a órbita do satélite e com as características do sensor.

Além desses fatores, as coberturas refletem energia em distintos comprimentos de onda e, por isso, a caracterização de um tipo de cobertura é bastante complexa. A mesma não tem um comportamento espectral único e permanente, que coincida com sua curva de reflectância espectral e que permita seu reconhecimento sem confusão com outra superfície. Porém, o conhecimento das curvas típicas de reflectância espectral da vegetação, solo e água.

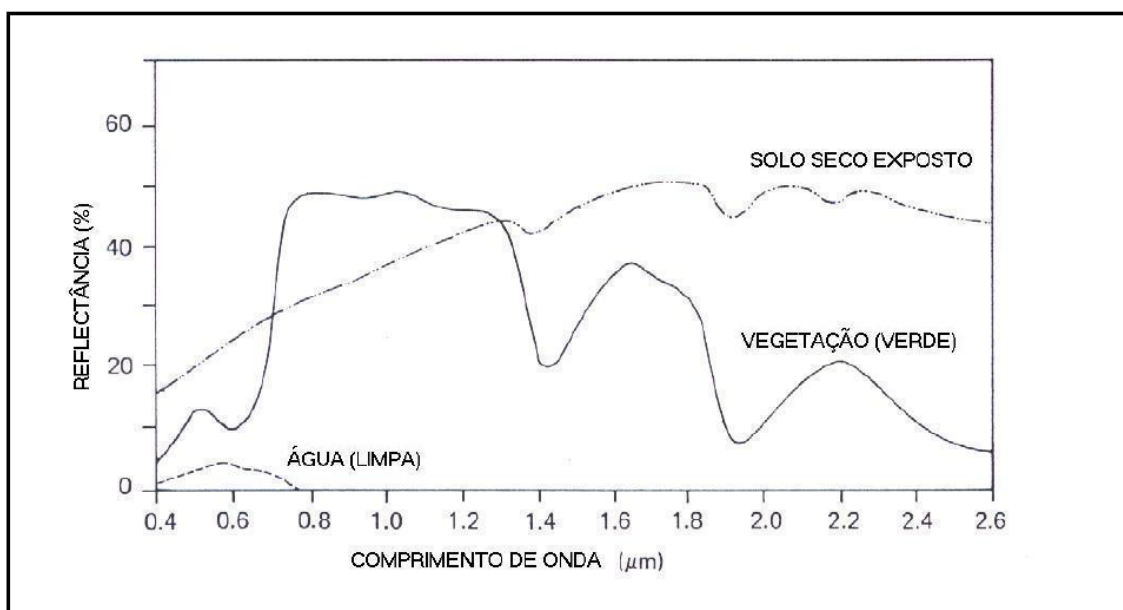


FIGURA 4. CURVAS TÍPICAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA, SOLO E VEGETAÇÃO.

FONTE: ADAPTADO DE LILLESAND E KIEFER (1987).

4.3.1.1. Comportamento Espectral da Água

Da radiação que atinge a superfície da água, parte penetra e parte é refletida, voltando para a atmosfera. A quantidade de radiação refletida depende das condições da superfície da água (plana ou ondulada) e principalmente do ângulo de incidência da radiação sobre esta. Ao penetrar na coluna d'água, a radiação é submetida a profundas alterações, tanto na sua intensidade quanto na sua composição espectral. Estas alterações dependem de fatores como quantidade de material dissolvido e quantidade de material em suspensão. A primeira alteração sofrida é a mudança de direção devido à refração provocada pela redução da velocidade ao penetrar no meio líquido. Em seguida, parte da radiação é absorvida e transformada em outras formas de energia, por exemplo, química pela fotossíntese e calorífica pelo aquecimento da água. Outra parte da radiação sofre dispersão devido ao choque com partículas suspensas ou dissolvidas na água. Assim, a absorção e a dispersão são os dois principais fatores, responsáveis pela atenuação da radiação com a profundidade nos ecossistemas aquáticos.

Entre as propriedades espectrais da água podem-se citar a absorptância, a transmitância e a reflectância. A FIGURA 5 mostra a absorptância da água pura. No infravermelho próximo, uma espessura de alguns decímetros de água é suficiente para absorver toda radiação solar incidente num corpo d'água, enquanto que no infravermelho médio é preciso apenas alguns milímetros. Isto pode ser percebido também na curva de reflectância da água (FIGURA 4), onde na região do infravermelho a reflectância é praticamente nula. No infravermelho próximo e no infravermelho médio os corpos d'água são praticamente negros e, portanto, facilmente identificáveis nas imagens, bem como úteis em métodos simplificados de correção atmosférica. Já no espectro visível, a água pura absorve pouca radiação incidente (SWAIN & DAVIS, 1978).

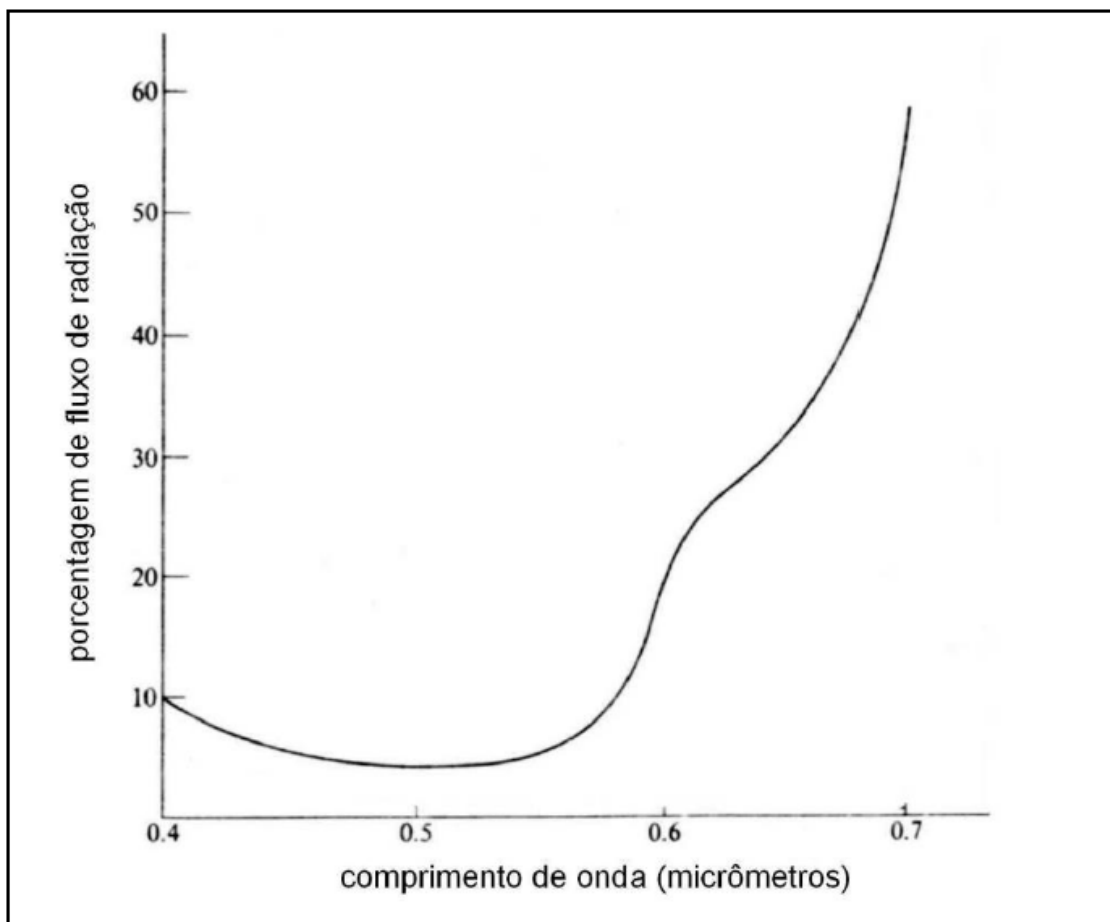


FIGURA 5. CURVA DE ABSORTÂNCIA DA ÁGUA.
FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978).

Quanto à transmitância, a água pura transmite muita radiação incidente nos comprimentos de onda inferiores a $0,6\mu\text{m}$. Este comportamento é

semelhante ao dos oceanos e de lagos limpos. A transmitância dos corpos d'água naturais diminui com o aumento da turbidez da água, enquanto que o comprimento de onda de máxima transmitância aumenta. A melhor região para as medidas espectrais da água é em torno de $0,48\mu\text{m}$, onde a transmitância é máxima.

Na FIGURA 6 estão ilustradas as curvas de transmitância de quatro diferentes tipos de água, para uma camada de 10 metros de profundidade. Percebe-se que a curva de transmitância de águas costeiras diminui em todos os comprimentos de onda em relação à água destilada ou oceânica. Isto é provocado pelo aumento do espalhamento devido à maior concentração de partículas em suspensão (SWAIN & DAVIS, 1978).

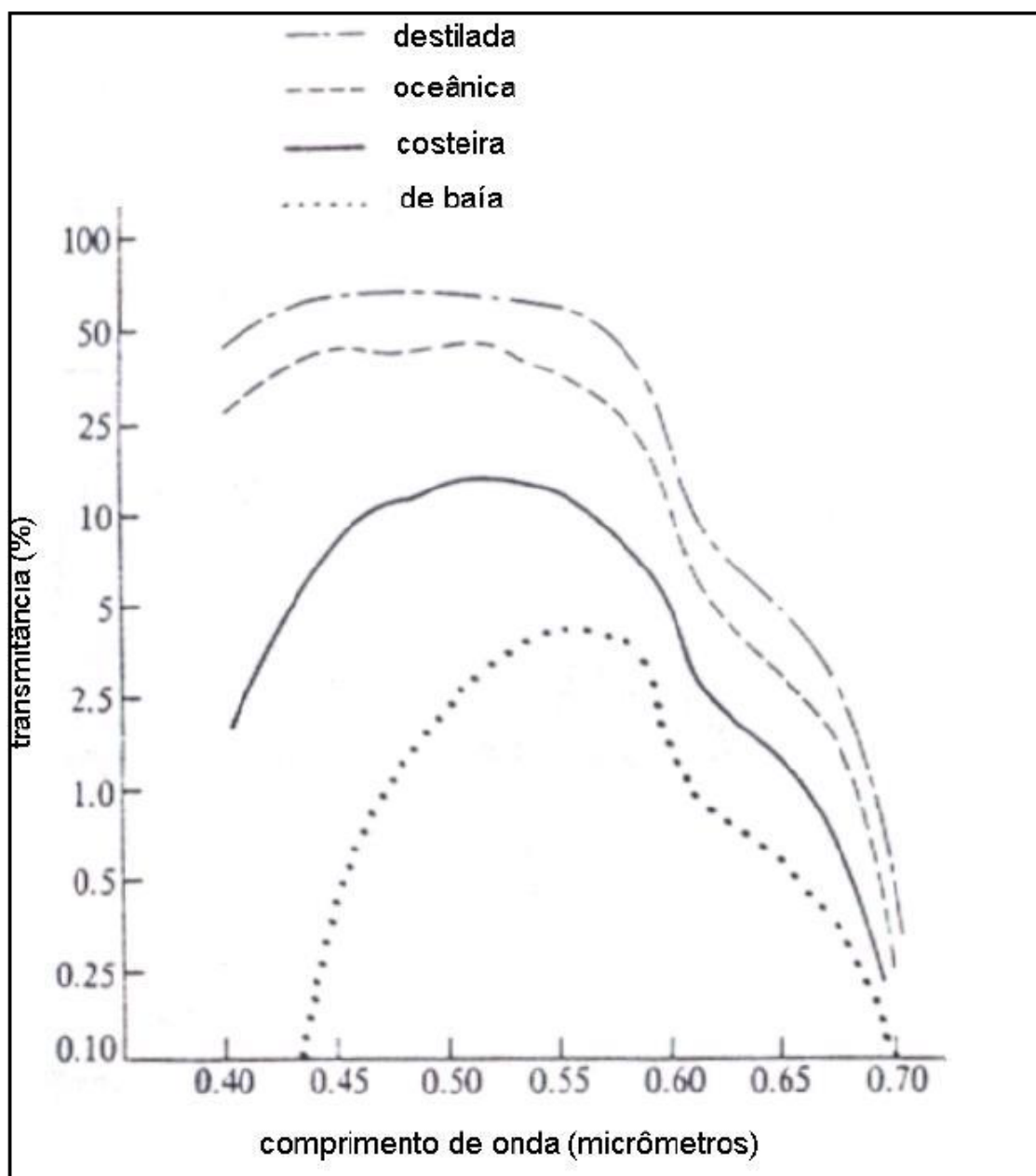


FIGURA 6. CURVA DE TRANSMITÂNCIA DA ÁGUA.
 FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS, 1978.

A reflectância de superfícies de águas naturais depende das propriedades espectrais da água e das substâncias dissolvidas e/ou em suspensão (fitoplânctons e/ou detritos de origem biológica, partículas minerais e matéria orgânica). As águas continentais são mais carregadas de sedimentos e matéria orgânica que as águas do mar. A água turva tem reflectância maior que a água limpa. O ponto de máxima reflectância da água turva também é maior que o da água limpa. A reflectância das águas continentais depende da profundidade e das características do fundo, quando elas são claras. Embora a

água seja clara, os corpos de água naturais podem parecer escuros devido à influência dos elementos constituintes do seu fundo (SWAIN & DAVIS, 1978).

No espectro visível manifestam-se várias condições dos corpos d'água, no entanto, nestes comprimentos de onda as interações da energia são bastante complexas e dependem de uma série de fatores como a reflexão especular, materiais suspensos na água, fundo do corpo d'água e variáveis climatológicas. Características da água como profundidade, quantidade de materiais em suspensão (clorofila, argilas e nutrientes) e rugosidade da superfície, podem alterar o comportamento espectral da água (CHUVIECO, 1990).

A presença de algum tipo de sedimento ou matéria dissolvida no corpo de água também influencia sua curva de reflectância espectral, sendo chamada assim de água turva, a FIGURA 7 apresenta a comparação entre o comportamento da curva de reflectância da água pura e da água turva.

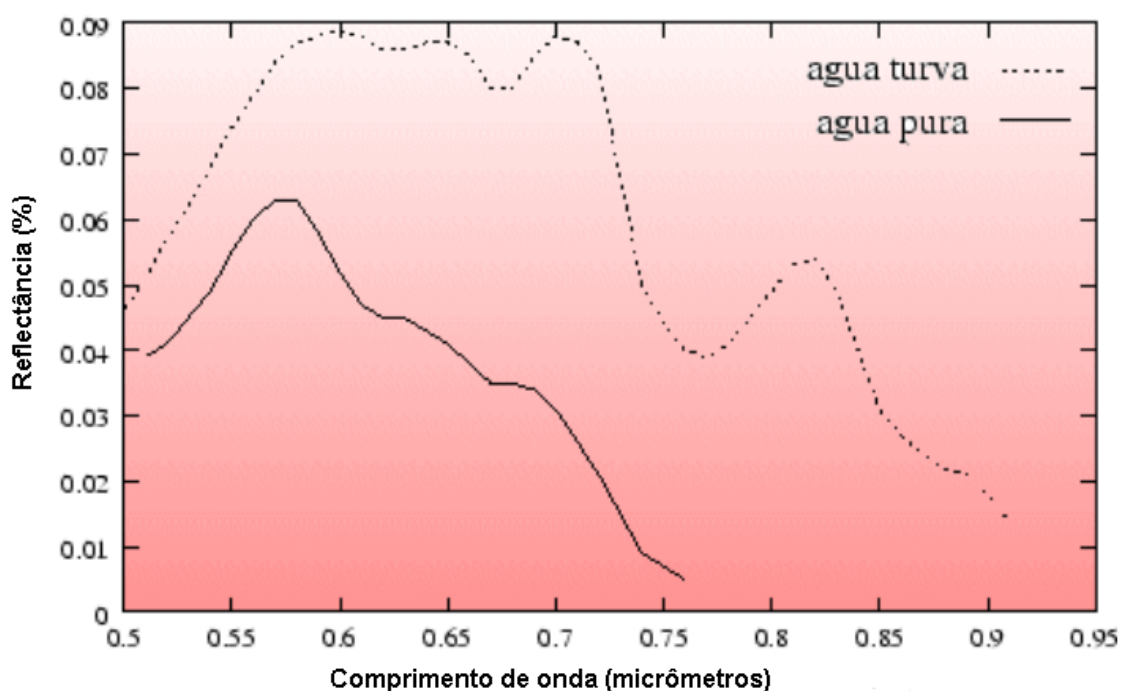


FIGURA 7. CURVAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA PURA E DA ÁGUA TURVA.

FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978).

A presença de clorofila também é outro fator importante que deve ser avaliado nos corpos de água, sua presença também altera o comportamento

espectral observado. A FIGURA 8 apresenta a comparação entre o comportamento da curva de reflectância espectral da água pura e da água com presença de clorofila.

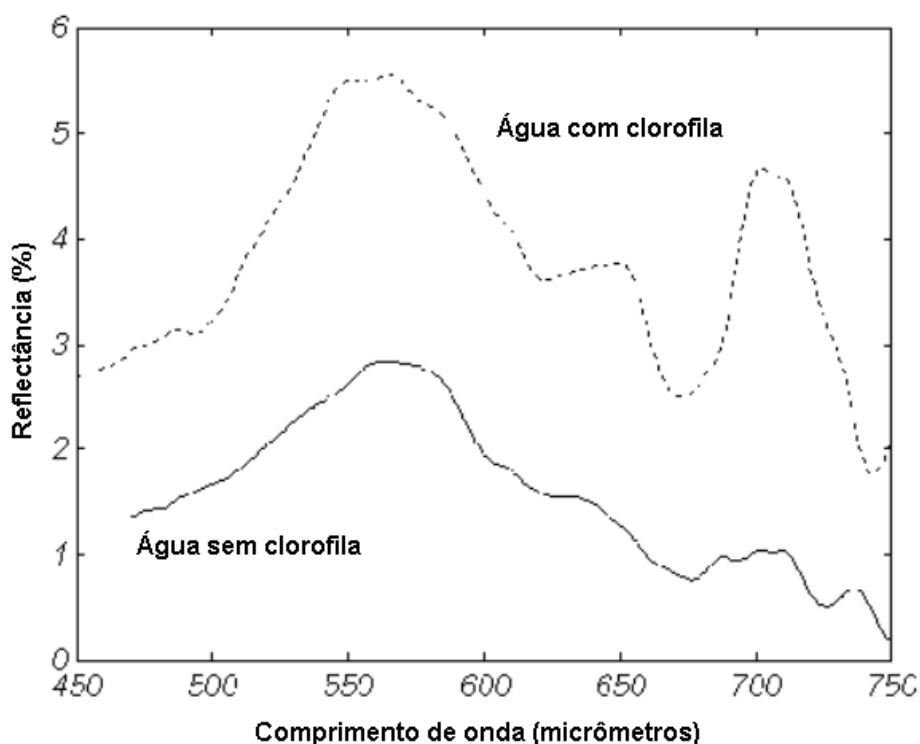


FIGURA 8. CURVAS DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA ÁGUA COM E SEM A PRESENÇA DE CLOROFILA.

FONTE: ADAPTADO DE SWAIN & DAVIS (1978).

4.3.2. Índices de Vegetação

Os índices de vegetação são operações aritméticas entre bandas espectrais de um sensor remoto, os quais podem ser calculados a partir de dados referentes aos valores de radiância, refletância. No entanto para uma mesma superfície, os resultados de cada uma destas variações do cálculo serão diferentes. Usando os níveis de cinza, os valores obtidos determinam a capacidade de distinção entre tipos ou condições de vegetação em termos relativos (SANTOS; PEREIRA, 2005).

Pode-se considerar como um dos principais índices de vegetação o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference*

Vegetation Index) – NDVI, o qual explora o comportamento espectral da vegetação nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo.

Segundo SANTOS e PEREIRA (2005), o NDVI foi definido de modo a explorar o fato de que o dossel vegetativo absorve fortemente a radiação espectral da região do vermelho (devido à presença de clorofilas e carotenos) e reflete intensamente na região do infravermelho próximo, como efeito de características estruturais das folhas. Este índice é calculado como a razão entre a diferença e a soma das medidas nas bandas do infravermelho próximo (IV) e do vermelho (V), conforme apresentado abaixo:

$$NDVI = \frac{IV - V}{IV + V}$$

O NDVI tem sido amplamente utilizado para a classificação de vegetação em imagens de satélite em diversos tipos de estudos e aplicações, pois oferece bom contraste em relação a outros alvos. Este também permite a determinação de parâmetros qualitativos, quantitativos e fisiológicos de culturas agrícolas e florestas, como, por exemplo, a idade de florestas e capacidade fotossintética.

Com a crescente demanda na utilização de sensores remotos para questões referentes ao monitoramento ambiental, entre elas, o monitoramento do estado trófico de reservatórios, COELHO et. al. (2011) propõem a utilização de dois novos índices voltados às análises em ambientes aquáticos: *Normalized Ratio Aquatic Vegetation Index – NRAVI* e *Ratio Aquatic Vegetation Index – RAVI*.

Estes novos índices foram criados considerando as características espectrais do pigmento clorofila a, que absorve a luz na região do vermelho (R) e reflete na região do verde (G), gerando então a seguinte formulação:

▪ **NRAVI:**

$$NRAVI = \frac{G - R}{G + R}$$

▪ **RAVI:**

$$RAVI = \frac{G}{R}$$

Em que:

G = Banda Verde (510 - 580nm)

R = Banda Vermelho (630 - 690nm).

A principal diferença entre estes índices propostos e os índices de vegetação convencionais (por exemplo, NDVI) é que os propostos foram calculados a partir de operações entre as faixas espectrais do vermelho e do verde, nas quais está contida a maior variação de respostas espectrais para a clorofila, presente tanto nas vegetações terrestres e aquáticas como em microrganismos aquáticos, já que a faixa do infravermelho próximo é completamente absorvida por corpos de água. Os demais índices são calculados usando as faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, nas quais está contida a maior variação de respostas espectrais para a vegetação, possibilitando assim uma determinação da concentração de clorofila mais eficiente quando da utilização dos índices RAVI e NRAVI (COELHO et. al., 2011).

4.3.3. Segmentação de Imagens Baseada em Objeto

A segmentação de imagens é um procedimento adotado antes da fase de classificação, que procura solucionar problemas encontrados nos procedimentos de classificação supervisionada e não supervisionada.

Para explorar de forma completa as informações fornecidas pelas imagens de alta resolução espacial e espectral, metodologias que vão além de análises estatísticas tradicionais e classificação de pixels individuais são requeridas. Classificações pixel a pixel não fazem uso explicitamente das características espaciais inerentes à imagem (BLASCHKE et. al., 2001).

O processo de segmentação de imagens consiste em dividir uma imagem em regiões ou segmentos compostos por conjuntos de pixels espectralmente uniformes. Essa técnica requer que sejam definidos os valores de similaridade e área (pixels), os quais possuem influência direta principalmente no número de polígonos gerados e no tempo de processamento de segmentação. Os valores de similaridade e área devem ser escolhidos empiricamente e dependem das características espectrais e espaciais da cena em questão (CÂMARA et. al., 1996).

RODENACKER et. al. (2003) discorrem sobre técnicas de extração de feições em imagens digitais, onde definem padrões de nomenclatura e características a serem aplicadas, os quais são divididos em quatro grandes grupos:

- **Características morfológicas:** são as medidas da forma dos objetos que compõem a imagem. Não leva em conta a intensidade dos pixels e pode ser extraídas de imagens binárias, resultado do processamento das imagens multiespectrais;
- **Características espectrais:** são as que descrevem a cor ou composição espectral da radiação emitida ou refletida dos objetos, quantificada pela intensidade dos pixels em diferentes bandas espectrais. Medidas estatísticas das intensidades, como média, mediana, desvio-padrão e outras, são usadas para caracterizar os pixels pertencentes a cada objeto. Estas características podem ser extraídas diretamente das bandas que compõem as imagens, ou de resultados de operações de processamento;
- **Características texturais:** são medidas que caracterizam a variabilidade local das intensidades dos pixels;
- **Características estruturais ou contextuais:** descrevem a relação topológica semântica entre um ou mais objetos que compõem a imagem. (especificar a relação)

A segmentação, em uma primeira instância, é determinada por um grau de homogeneidade que permita um agrupamento de pixels de acordo com uma resolução o mais fina possível. Usando segmentações repetidas ou re-segmentação, mais parâmetros poderão ser inseridos construindo, assim, relações entre os objetos em diferentes níveis (ANTUNES, 2003).

O critério de semelhança é usado para definir a uniformidade dos segmentos. Dois critérios são usados para descrever a separação do objeto da imagem: critério da cor (espectral) e o critério da forma (suavização e compactação). Estes critérios controlam a homogeneidade dos segmentos e regiões (BAATZ et. al., 2001).

A técnica de segmentação multirresolução é considerada similar à utilizada pelo processo de segmentação por crescimento de região (ANTUNES, 2003), na qual cada pixel é rotulado seguindo um critério de similaridade para cada par de regiões adjacentes espacialmente (GONZALES; WOODS, 2000). Ambas as técnicas realizam um teste de hipótese estatístico que testam a média entre as regiões para realizar o agrupamento considerando os critérios de similaridade, diferenciando-se pelo fato de que a segmentação multirresolução considera os parâmetros de forma.

Durante o processo, a metodologia adotada na segmentação multirresolução particiona a imagem em regiões homogêneas, podendo ser influenciada por parâmetros de escala, tonalidade e forma, em que:

- O parâmetro de escala influencia a heterogeneidade dos pixels, definindo o tamanho dos objetos;
- A tonalidade equilibra a homogeneidade das cores dos segmentos com a homogeneidade da imagem utilizada;
- O parâmetro de forma promove o equilíbrio entre a suavidade da borda de um segmento e a compacidade, estabilizando os critérios de homogeneidade dos objetos primários (WHITESIDE et. al., 2005).

BAATZ et. al. (2001) ressalta que a característica principal do procedimento está relacionada ao fato de os novos segmentos possuírem relações com os segmentos que os constituem em um nível hierárquico mais baixo, permitindo o reagrupamento dos objetos, formando objetos maiores (FIGURA 9) ou a subdivisão dos objetos, formando objetos menores.

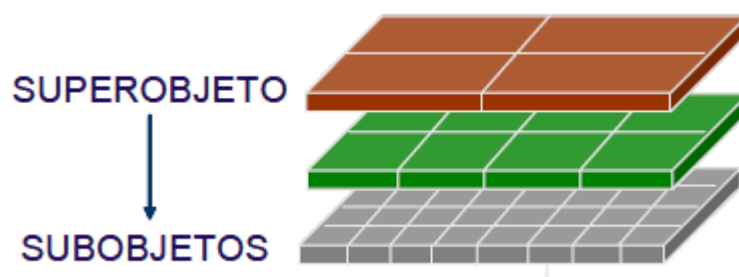


FIGURA 9. REDE HIERÁRQUICA DE OBJETOS
 FONTE: ADAPTADO DE KERSTING (2006).

Assim, a segmentação multirresolução é realizada com base em parâmetros espectrais e de forma, que formam os objetos do nível superior pelo agrupamento dos objetos do nível inferior ou formam os objetos do nível inferior pela subdivisão dos objetos do nível superior, permitindo que as feições de diferentes escalas possam ser representadas simultaneamente e serem classificadas umas em relação às outras (KERSTING, 2006).

4.3.4. Classificação de Imagens Baseada em Objeto

Os dados obtidos através das novas técnicas de sensoriamento remoto, os quais possuem tanto alta resolução espacial, alta qualidade espectral, geram problemas devido ao grande volume de dados a serem manipulados bem como ao seu alto nível de detalhe. Desta forma a aplicação de técnicas inovadoras e que permitam um processamento mais ágil vem ganhando espaço e tem-se o modelo de classificação orientada a objeto como uma alternativa as técnicas convencionais para aprimorar a manipulação de grandes quantidades de informação.

Antes da classificação, é realizado um processo de segmentação com o objetivo de dividir a imagem em regiões homogêneas e solucionar problemas de subjetividade em classificações supervisionadas. O processo consiste em separar os atributos espectrais da imagem em regiões homogêneas, isto é, os pixels com características similares (forma, textura, área, parâmetros espectrais) são associados (MOREIRA, 2001).

Ao contrário dos métodos tradicionais para a classificação digital de imagens, na classificação orientada ao objeto, a análise é realizada sobre objetos ou segmentos na imagem e não apenas sobre pixels (PINHEIRO, 2003).

Nos dados gerados pelo sensoriamento remoto de alta resolução e que apresentam alta variabilidade, os pixels analisados de forma individual apresentam pouca informação, desta forma, por meio da formação dos segmentos, há uma nítida melhoria na relação de análise. A utilização de procedimentos tradicionais baseados em pixels na análise destas imagens faz com que as áreas assumidas como tematicamente homogêneas sejam analisadas independentemente, o que pode resultar em uma classificação deficitária (NEUBERT, 2001).

GONÇALVES (2001) cita que entre os motivos para se adotar a classificação de imagens orientada a objeto, podem ser considerados:

- O processamento de imagens aproxima-se mais dos processos cognitivos humanos que as análises baseadas em *pixel*;
- É mais fácil incorporar informação de contexto com significado em uma abordagem orientada ao objeto do que em uma abordagem apenas por *pixel*.
- A classificação tem por objetivo tornar o processo de mapeamento ou reconhecimento de características da superfície terrestre menos subjetivo e com maior potencial de repetição em situações subsequentes;
- A classificação multispectral mediante regras *fuzzy* tem como finalidade substituir a análise visual dos dados por técnicas quantitativas de análise automática, visando à identificação dos elementos presentes na cena, representando assim a pertinência a um conjunto com a distribuição de possibilidades. Durante o processo de classificação as regras *fuzzy* podem ser combinadas com, por exemplo, regras de mínima distância.

Ao se utilizarem métodos orientados a objeto na análise de imagens orbitais, dispõe-se de uma grande quantidade de propriedades para a descrição das respectivas classes. Ao lado da opção de utilizar informações espectrais, estão incluídas também em contraponto aos procedimentos clássicos baseados em pixel, propriedades de forma e textura bem como

relação de vizinhança na interpretação. Estas se encontram vinculadas às relações topológicas entre os objetos (KOK et. al., 2005).

5. ÁREA DE ESTUDO

5.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A área escolhida para desenvolvimento dos estudos propostos é o reservatório de abastecimento público do Rio Iraí, também conhecido como Reservatório do Iraí, o qual está localizado a leste da Região Metropolitana de Curitiba, entre os municípios de Piraquara, Pinhais e Quatro Barras e ocupa uma área superficial de 14,6 km², com capacidade para armazenar 52,5 bilhões de litros de água.

A região em que está localizado o Reservatório do Iraí, determinada como área de estudos para a realização das atividades propostas neste projeto é apresentada na

FIGURA 10.

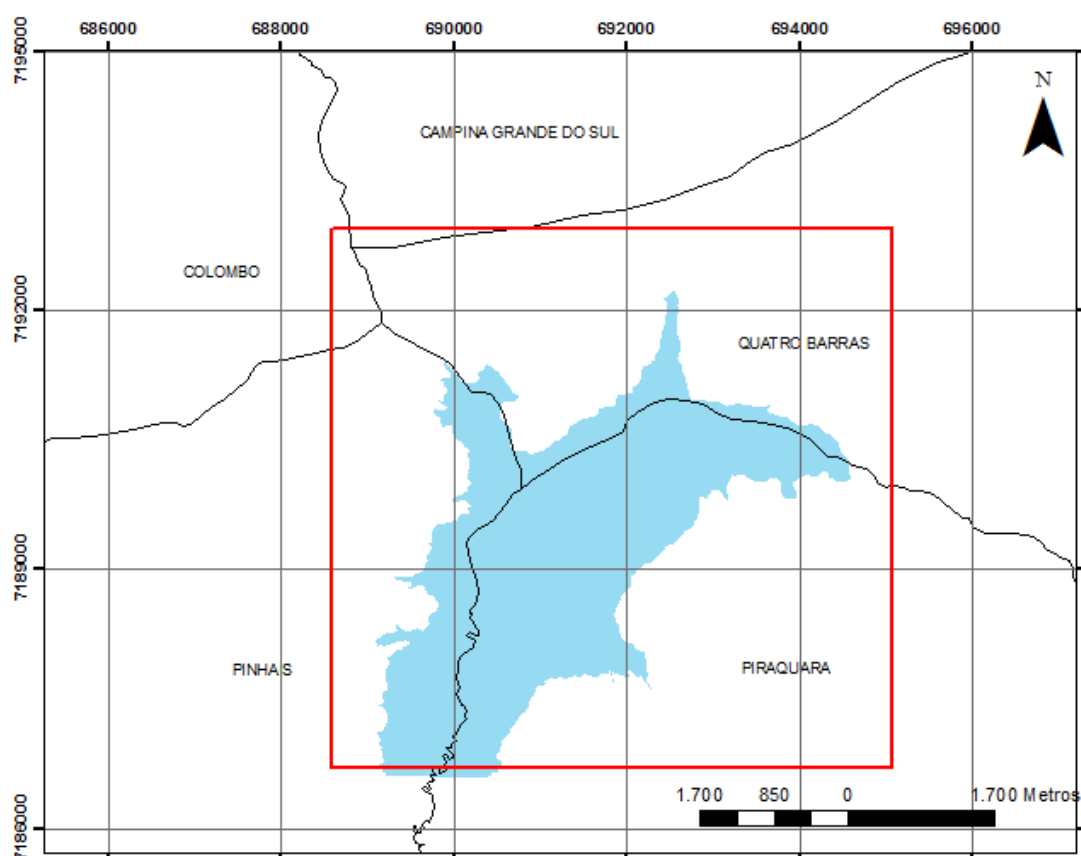


FIGURA 10. CARTOGRAMA DE LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: BASE CARTOGRÁFICA ITCG (2010).

De acordo com a PREFEITURA MUNICIPAL DE PINHAIS (2012) a Barragem do Iraí foi inaugurada em 02 de agosto de 2000. Construída no limite de Pinhais, Piraquara e Quatro Barras, a obra tem o objetivo de garantir o abastecimento de aproximadamente dois milhões de habitantes residentes na Região Metropolitana de Curitiba. A represa ainda contribui para reduzir os problemas de enchentes enfrentados por diversos bairros de Pinhais e Piraquara. Mesmo estando em uma APA - Área de Proteção Ambiental, esta ocupa uma área significativa dos municípios de Pinhais, Piraquara e Quatro Barras, em uma região com forte pressão demográfica e que está constantemente sujeita a ocupações irregulares. (PREFEITURA MUNICIPAL DE PINHAIS, 2012).



FIGURA 11. RESERVATÓRIO DO IRAÍ, VISTA DO MUNICÍPIO DE PINHAIS.
FONTE: O AUTOR (2011).

5.2. SOBRE O RESERVATÓRIO DO IRAÍ

O Reservatório do Rio Iraí é o maior reservatório artificial para armazenamento de água do Estado do Paraná. Com capacidade para armazenar cerca de 52,5 bilhões de litros de água (BARRAGEM DO IRAÍ, 2000).

Para viabilizar a construção de todo o complexo do Iraí, foram investidos R\$ 27 milhões, com recursos aplicados pela Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR, através do Programa de Saneamento Ambiental (Prosam), financiados pelo Banco Mundial. A obra faz parte de um complexo construído com o objetivo de ampliar em 30% a oferta de água com qualidade para a Região Metropolitana de Curitiba. Este sistema possui também uma estação de tratamento de água e 110 km de redes de distribuição (BARRAGEM DO IRAÍ, 2000).

Outra função do reservatório é evitar as constantes cheias do Rio Iraí, na região de Pinhais, e contribuir para o controle da vazão dos demais rios que compõem sua rede hidrográfica.

A área onde está implantado o complexo de abastecimento de água do Rio Iraí possui 11,5 mil hectares, e suas regiões próximas não podem receber qualquer tipo de investimento que venha gerar algum tipo de poluição, tendo sua ocupação restrita, pois em 1996 a região foi transformada em Área de Proteção Ambiental – APA, através de um decreto governamental.

A proteção cobre toda a extensão do manancial do Iraí, o qual abrange os municípios de Colombo, Pinhais, Piraquara, Quatro Barras e Campina Grande do Sul. Para assegurar uma ocupação ordenada e compatível com as necessidades geradas pela implantação do reservatório, também foi instituído o Zoneamento Ecológico-Econômico da APA do Iraí, o qual define todos os parâmetros de uso e ocupação da terra na região.

Uma das poucas atividades permitidas na região é o ecoturismo, que pode ser desenvolvido em todo o eixo histórico da Estrada da Graciosa, na rota dos mananciais, na própria represa do Iraí, nas áreas próximas à Mata Atlântica e no eixo histórico da Colônia Faria. Entre os empreendimentos permitidos na Estrada da Graciosa estão hotéis, pousadas e restaurantes que não causam poluição ou danos ao meio ambiente (BARRAGEM DO IRAÍ, 2000).

6. MATERIAIS

Para a execução das atividades propostas neste projeto, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Notebook LG; Processador Intel Core i7 2,70GHz; Memória RAM 6GB; HD de 500GB;

Os softwares utilizados ao longo do desenvolvimento das atividades foram:

- Erdas Imagine 9.1;
- ENVI 4.7;
- ArcInfo 9.3;
- eCognition Developer 8, versão 64 bits;

As imagens orbitais multiespectrais utilizadas foram cedidas pela DigitalGlobe e são provenientes do satélite de alta resolução WorldView-2.

6.1. IMAGENS WORLDVIEW-2

O WorldView-2, satélite desenvolvido e monitorado pela empresa americana DigitalGlobe, foi lançado em 08 de outubro de 2009 e começou a fornecer imagens aos consumidores a partir do segundo bimestre de 2010. Ele possui resolução espacial de 50 cm na banda pancromática, 17 cm a mais do que seu antecessor *QuickBird*, e 2,0 m nas bandas multiespectrais. Também possui capacidade de coleta de imagens em curto espaço temporal, sendo seu prazo de revisita de 1,1 dia (DIGITALGLOBE, 2012).

Este sistema de imageamento orbital possui uma banda pancromática e 8 bandas multiespectrais, fato este que pode auxiliar na identificação de alvos e feições, possibilitando inúmeras análises até então não executadas. Além das quatro bandas disponíveis em sensores de alta resolução espacial; vermelho, verde, azul e infravermelho próximo possui quatro bandas adicionais: azul

costeiro (*coastal*), aplicável a trabalhos oceanográficos; amarela, indicada para distintas classificações; vermelho limítrofe e infravermelho-2, voltadas para análises e classificações de vegetação e estudos de biomassa (DIGITALGLOBE, 2012).

A TABELA 3 apresenta algumas especificações técnicas sobre o sistema de imageamento orbital WorldView-2.

TABELA 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO ORBITAL WORLDVIEW-2.

Lançamento	Data: 08/10/2009 Veículo de lançamento: Delta II 7920 Local de lançamento: Base aérea de Vandenberg, Califórnia, EUA
Órbita	Altitude: 770Km Tipo: Heliossíncrona, 10:30h passagem descendente Período: 100 minutos
Bandas	Pancromática, Multiespectral e quatro novas bandas (azul costal (<i>coastal</i>), amarelo, vermelho limítrofe, e infravermelho-2)
Resolução Espacial	50 cm (pancromático) 2,00 m (multiespectral)
Resolução Radiométrica	11 bits por pixels
Comprimento da faixa	16,4 km no nadir
Angulo máximo de visada	+/- 45° off-nadir = 1036 km
Capacidade de coleta	975 mil km ² por dia
Resolução temporal	1,1 dias 30° off nadir

FONTE: DIGITALGLOBE (2012).

A banda pancromática e as oito bandas multiespectrais disponibilizadas pelo sensor possuem as características de configuração espectral apresentadas na FIGURA 12.



FIGURA 12. GRÁFICO DO INTERVALO ESPECTRAL DA BANDA PANCROMÁTICA E DAS BANDAS MULTIESPECTRAIS DO SENSOR WORLDVIEW-2.
FONTE: ADAPTADO DE DIGITALGLOBE (2012).

Cada uma destas bandas possuem algumas características específicas, as quais são fornecidas pela DIGITALGLOBE (2012), sendo estas apresentadas na **TABELA 4**.

TABELA 4. INTERVALO ESPECTRAL DAS BANDAS DISPONIBILIZADAS PELO SENSOR WORLDVIEW-2.

Banda	Intervalo Espectral
Pancromática	(450 – 800nm)
Azul Costal	(400 - 450nm)
Azul	(450 - 510nm)
Verde	(510 - 580nm)
Amarelo	(585 - 625nm)
Vermelho	(630 - 690nm)
Vermelho Limítrofe	(705 - 745nm)
Infravermelho 1	(770 - 895nm)
Infravermelho 2	(860 - 1040nm)

FONTE: DIGITALGLOBE (2012).

7. METODOLOGIA

Baseado nos estudos realizados por meio da revisão bibliográfica estruturou-se a metodologia aplicada ao projeto, conforme fluxograma apresentado na **FIGURA 13**.

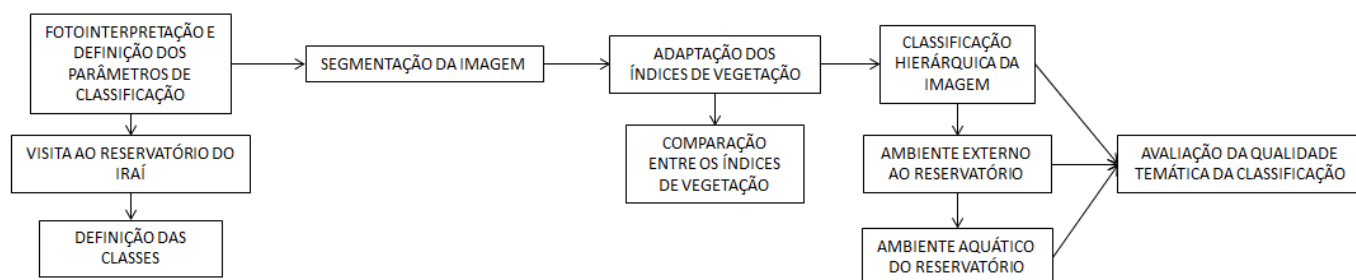


FIGURA 13. FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS.
FONTE: O AUTOR (2013).

7.1. FOTOINTERPRETAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO

Devido ao fato de as imagens utilizadas possuírem uma grande quantidade de informações e um alto nível de detalhamento, foi necessário realizar algumas visitas em campo para aprimorar o processo de fotointerpretação e assim poder definir com melhor precisão as classes de interesse, tanto para o ambiente externo quanto para o ambiente aquático da região do Reservatório do Iraí.

7.1.1. Visita ao Reservatório do Iraí

As visitas ao Reservatório do Iraí foram realizadas nos meses de maio e agosto de 2012, a visita realizada no mês de maio possibilitou conhecer de

perto a situação da área de estudos, suas características, como por exemplo, vegetação, perfil de ocupação na região externa e algumas particularidades do ambiente aquático, como por exemplo, tipos de vegetações aquáticas existentes, como também realizar o reconhecimento de toda a estrutura do complexo da barragem e suas instalações.

No mês de agosto foram realizadas novas visitas ao reservatório com o intuito de fazer o reconhecimento deste no mesmo período do ano em que as imagens utilizadas foram capturadas, como estas são datadas de 26 de agosto de 2010 e os grandes reservatórios de abastecimento possuem um comportamento sazonal, no que se refere ao volume de água e características de florações, desta forma pode-se observar as características em campo muito semelhantes à época.



FIGURA 14. RESERVATÓRIO DO IRAÍ - INSTALAÇÕES DA SANEPAR.
FONTE: O AUTOR (2013).

Outro fator de extrema importância foi o contato com os técnicos que trabalham diretamente com as questões referentes ao dia-a-dia do reservatório, os quais compartilharam sua experiência e puderam contribuir com algumas questões, como a definição das características das feições existentes em cada classe a ser mapeada.

7.1.2. Definição das Classes

7.1.2.1. Ambiente externo ao Reservatório

Para definição das classes de interesse no ambiente externo ao Reservatório do Iraí, foi realizado o processo de fotointerpretação da imagem, combinado com as visitas realizadas para identificação das características das feições existentes. Desta forma foram definidas as seguintes classes para serem utilizadas no processo de classificação hierárquica:

- **Água:** delimita a região do ambiente aquático do Reservatório do Iraí, a qual será descrita em maiores detalhes no próximo item;
- **Área Urbanizada:** apresenta as regiões com a existência de algum tipo de edificação ou que sofreram alguma influencia antrópica, como, por exemplo, áreas de ruas e pátios.
- **Solo Exposto:** composta por regiões onde não há existência de vegetação e nenhum tipo de construção. Apresenta as áreas onde o solo está exposto, seja por falta de utilização ou por desmatamento desordenado;
- **Vegetação Densa:** apresenta as regiões recobertas por vegetação de alta densidade, ou seja, áreas com grandes árvores e cobertura vegetal intensa;
- **Vegetação Rasteira:** apresenta as regiões recobertas por algum tipo de vegetação considerada baixa, como por exemplo, áreas de pastagens, gramados ou florestas pouco desenvolvidas.

7.1.2.2. Ambiente aquático do Reservatório

Para a definição das classes de interesse foi realizado o processo de fotointerpretação da imagem, onde se definiram alguns pontos ao longo do reservatório que determinavam as diferentes feições e características

particulares do ambiente de estudo. Esses pontos de determinação das classes são apresentados na FIGURA 15.

Para cada ponto selecionado foi criado um identificador, o qual estabelece uma relação entre as localizações geográficas das classes com seus respectivos atributos de classificação. Essa relação é apresentada na TABELA 5.

TABELA 5. TABELA COM A RELAÇÃO ENTRE A LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA E A CLASSIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES.

Ponto	ID	E	N	Classe
01	1	692494,00	7191490,00	Macrófitas
02	1	694338,00	7190480,00	Macrófitas
03	2	694082,00	7190420,00	Erva de Jacaré
04	3	692192,00	7190410,00	Água Turva
05	3	690832,00	7189480,00	Água Turva
06	3	691028,00	7188730,00	Água Turva
07	3	690032,00	7187820,00	Água Turva
08	4	691858,00	7188680,00	Vegetação marginal
09	5	691659,00	7188560,00	Baixios com solo escuro
10	1	690018,00	7191200,00	Macrófitas
11	6	690011,00	7190880,00	Baixios
12	6	692005,00	7187970,00	Baixios

FONTE: O AUTOR (2013).

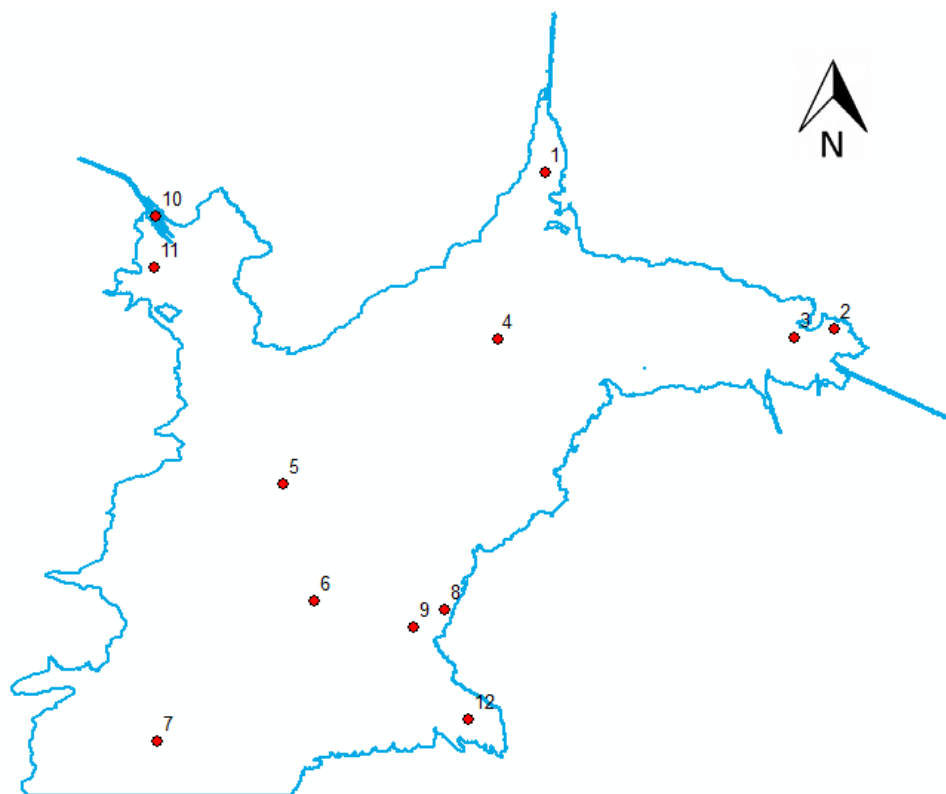


FIGURA 15. PONTOS PARA DEMARCAÇÃO DAS CLASSES DE INTERESSE.
FONTE: O AUTOR (2013).

Após a realização da visita ao Reservatório do Iraí e o término do processo de fotointerpretação da imagem, definiram-se as diferentes características existentes na região de interesse. Desta forma, estas foram divididas em seis classes distintas, sendo:

- **Macrófitas:** tipo de vegetação aquática predominantemente encontrada ao norte, nas regiões onde os três rios que alimentam o reservatório desaguam. Possuem concentração de clorofila elevada, porém ficam submersas, criando um aspecto esverdeado na água.

- **Erva de Jacaré:** encontrada apenas na região nordeste do reservatório, é um tipo de vegetação que também pode ser classificado como macrófitas, porém de uma espécie que emersa na lamina d água, mas possui raízes submersas que criam um aspecto lodoso ao local. Este tipo de vegetação gera diversos transtornos aos técnicos, pois, além de impedir a navegação, produzem grande quantidade de nutrientes que afetam o equilíbrio do reservatório.

- **Água Turva:** são regiões do reservatório que possuem uma composição de diversos tipos de nutrientes, matérias dissolvidas e florações de cianobactérias, também conhecidas como microalgas, ou seja, organismos microscópicos, mas que possuem uma alta concentração de clorofila. Aparece ao longo de toda a área do reservatório, pois estes mudam sua localização ao longo do reservatório de acordo com a corrente de água, sofrendo interferências do vento e da vazão do reservatório.

- **Baixios com solo escuro:** Região do reservatório que possui pouca profundidade e seu solo é mais escuro que as demais, este fato ocorre porque nas margens destes locais existia o cultivo de grama, a qual necessitava da chamada terra preta e adubada para se desenvolver, e, devido a ações do homem e das chuvas, esta terra era levada para dentro do reservatório, acumulando-se ao fundo.

- **Baixios:** regiões de pouca profundidade, tendo em média de 40 a 60 centímetros.

Com este processo, também foi possível determinar algumas características peculiares envolvendo o Reservatório do Iraí, as quais influenciarão nos resultados do processo de classificação e devem ser levados em consideração no momento da definição dos parâmetros deste processo, como, por exemplo, a existências de regiões dentro da área do reservatório onde havia a exploração de areia, ou seja, áreas com profundidades destoantes do padrão observado ao longo de toda região. Também, outro fator relevante é a existência, na região norte do reservatório, de locais onde há uma grande quantidade de matéria orgânica acumulada, devido ao fato de, no momento do enchimento do lago, a vegetação densa existente no local não ter sido removida.

Para cada ponto demarcado dentro dos limites do reservatório para a identificação das classes determinadas anteriormente existe na imagem um objeto segmentado associado, provindo do processo segmentação multirresolução aplicado, os quais possuem características como, por exemplo, forma, textura e cor. Desta forma, as regiões delimitadas por cada uma das classes pré-estabelecidas será analisada banda a banda, e de acordo com os índices aplicados, fato que possibilitará diagnosticar o comportamento de cada

uma das classes, para a correta parametrização do processo de classificação e assim extrair o máximo de informações disponibilizadas pela imagem.

7.2. SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM

Com o objetivo de criar os objetos e atribuir suas respectivas características, foi realizado o processo de segmentação multirresolução, partindo do nível mais detalhado para o menos detalhado, ou seja, do nível de menor escala para o nível de maior escala

No processo de segmentação baseada em objeto, foram utilizadas as oito bandas multiespectrais da imagem, onde para todas foi atribuído o mesmo peso, gerando assim quatro níveis com parâmetro de escala crescente, sendo: 10 (FIGURA 16), 20 (FIGURA 17), 50 (FIGURA 18) e 100 (FIGURA 19). O parâmetro de escala tem caráter espectral e influencia a heterogeneidade dos pixels, definindo o tamanho dos objetos, sendo assim, observando os níveis gerados percebe-se o crescimento dos objetos de acordo com o aumento do parâmetro de escala.

Neste processo, os diferentes parâmetros de escala foram combinados com os parâmetros de compacidade e de suavidade, os quais são utilizados como critério para definição das formas. Sendo assim, visando à obtenção de segmentos com maior homogeneidade entre si e que caracterizassem a região de estudos de forma condizente com a realidade encontrada no local, foi definido o parâmetro de compacidade como 0,5 e o parâmetro de suavidade como 0,1.

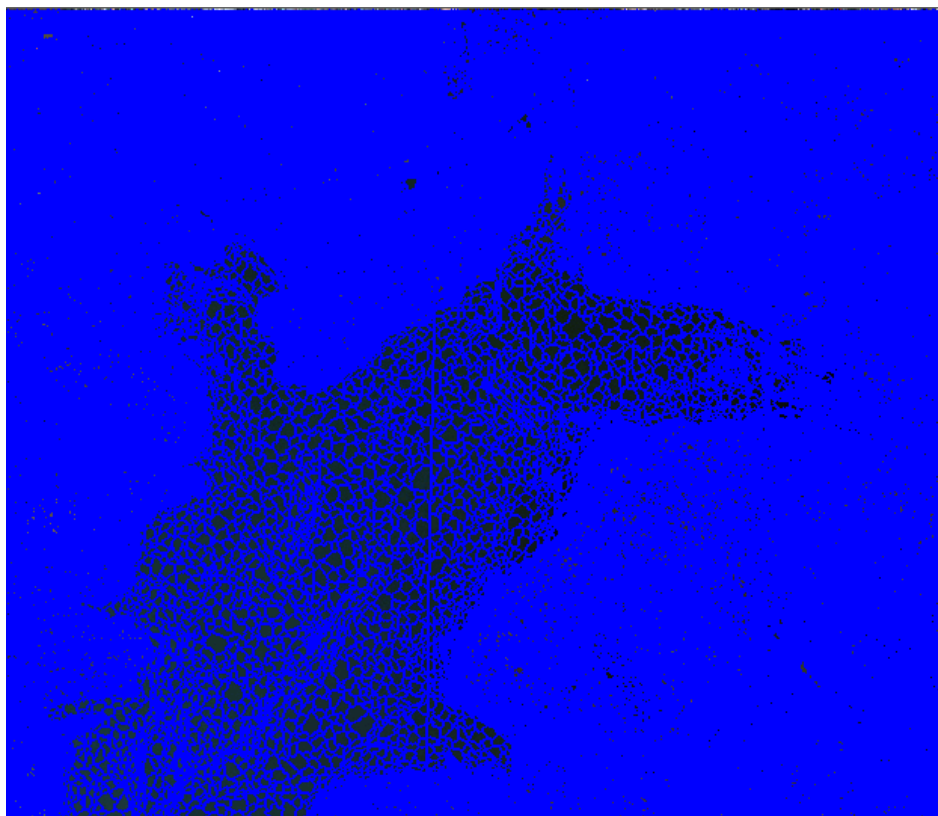


FIGURA 16. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 10.
FONTE: O AUTOR (2013).

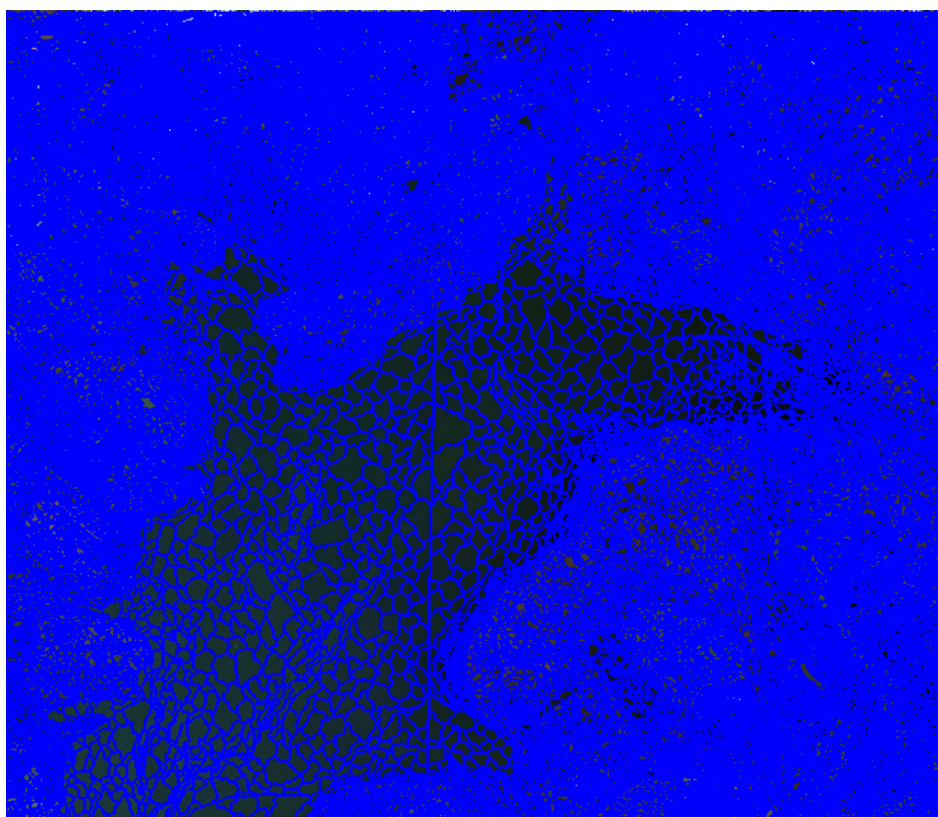


FIGURA 17. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 20.
FONTE: O AUTOR (2013).

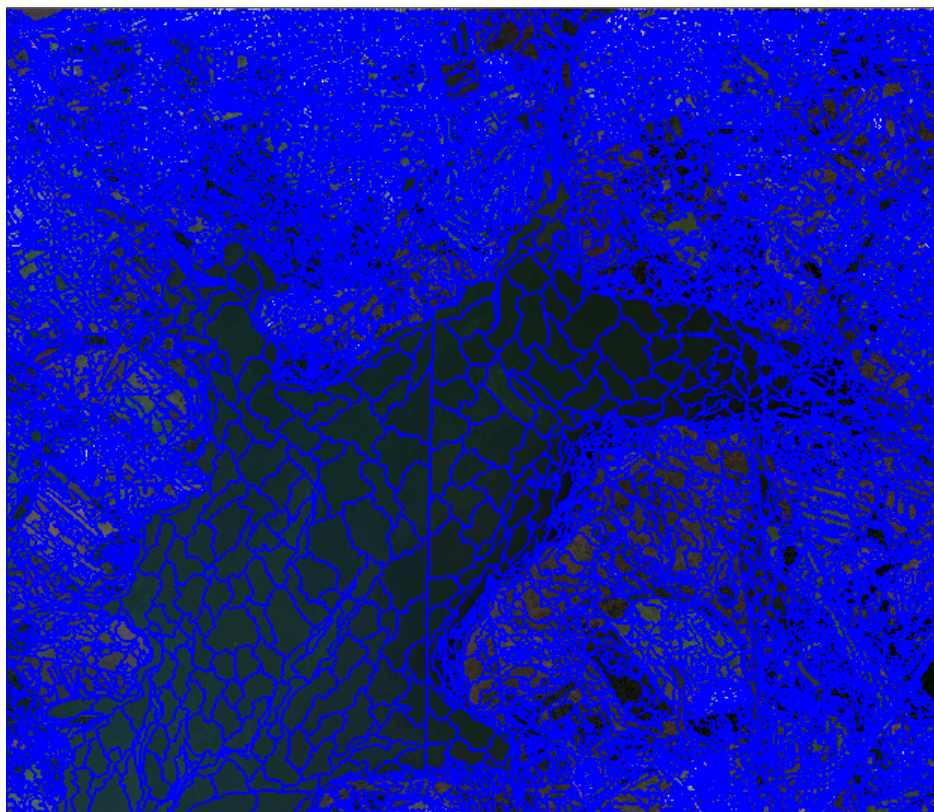


FIGURA 18. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 50.
FONTE: O AUTOR (2013).

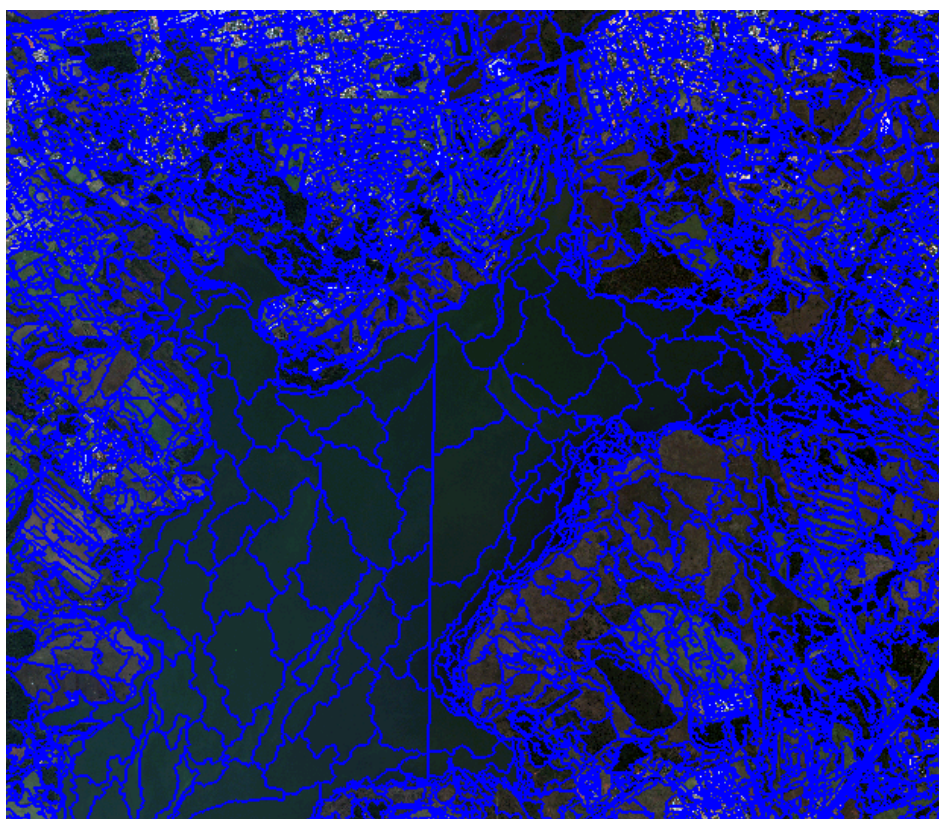


FIGURA 19. SEGMENTOS OBTIDOS COM O PARÂMETRO DE ESCALA 100.
FONTE: O AUTOR (2013).

Este processo realizado pode ser descrito como uma fusão de regiões, onde os segmentos oriundos de um processo de segmentação que utiliza o parâmetro de escala menor correspondem a uma região menor e estes segmentos são fundidos para gerar objetos maiores, para um nível onde o parâmetro de escala definido também é maior. Para realizar esta fusão de objetos são considerados alguns parâmetros de heterogeneidade, aplicados sobre as características de forma e de cor para cada objeto envolvido no processo.

Desta forma o processo de segmentação gera os níveis hierárquicos que possuem parâmetros de escalas crescentes, onde, em cada um deles, os objetos, resultantes das diversas etapas do processo, assumem suas propriedades que permitiram a realização do processo de classificação hierárquica. Cada nível obtido irá corresponder a determinadas classes estabelecidas, de forma que quanto mais detalhado for o nível de segmentos maior será o número de classes existentes nele.

7.3. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Com o objetivo de determinar as regiões com a existência de algum tipo de vegetação, tanto aquáticas dentro do corpo de água do Reservatório do Iraí, como terrestres na região de seu entorno, foram aplicados os índices de vegetação NDVI, RAVI e NRAVI na imagem orbital WorldView-2. Porém como esta possui oito bandas multiespectrais, diferenciadas em cada faixa do espectro eletromagnético, foi necessário aplicar nos índices existentes as corretas faixas espectrais, para que estes reconhecessem as bandas correspondentes às de interesse, neste caso as bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo.

7.3.1. NDVI

Nesta etapa foram realizados alguns testes com o índice NDVI, substituindo a banda do infravermelho 1 (banda 07) pela banda do infravermelho 2 (banda 08), combinando-a com a banda do vermelho (banda 05) e também mantendo a banda do infravermelho 1 (banda 07) e substituindo a banda do vermelho (banda 05) pela banda do vermelho limítrofe (banda 06), pois analisando suas faixas espectrais e as respostas dos tipos de vegetação mencionados acreditou-se que o resultado poderia ser interessante, porém nenhuma destas combinações gerou resultados significativos, ao comparados com a utilização do NDVI de forma padrão, para a realização de análises e detecção de vegetações em ambientes aquáticos.

Desta forma aplicou-se o NDVI às bandas multiespectrais da imagem, de acordo com seus respectivos comprimentos de onda, sendo assim utilizou-se as bandas 05 (vermelho) e 07 (infravermelho 1), conforme apresentado na expressão abaixo:

$$NDVI = \frac{Banda\ 07\ (770 - 895nm) - Banda\ 05\ (630 - 690nm)}{Banda\ 07\ (770 - 895nm) + Banda\ 05\ (630 - 690nm)}$$

7.3.2. NRAVI

Para aplicação do NRAVI foram utilizadas as bandas 03 (verde) e 05 (vermelho), aplicadas de acordo com a seguinte expressão:

$$NRAVI = \frac{Banda\ 03\ (510 - 580nm) - Banda\ 05\ (630 - 690nm)}{Banda\ 03\ (510 - 580nm) + Banda\ 05\ (630 - 690nm)}$$

7.3.3. RAVI

Para aplicação do RAVI foram utilizadas as bandas 03 (verde) e 05 (vermelho), aplicadas de acordo com a seguinte expressão:

$$RAVI = \frac{\text{Banda 03 (510 - 580nm)}}{\text{Banda 05 (630 - 690nm)}}$$

7.4. CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DA IMAGEM

O processo de classificação dos objetos segmentados foi dividido em duas etapas, sendo a primeira etapa o processo de classificação do ambiente externo ao Reservatório do Iraí, ou seja, toda a região que influencia o meio ambiente e a segunda etapa o processo de classificação do ambiente aquático do reservatório.

Nestas etapas foram utilizadas as seguintes metodologias de classificação combinadas: mínima distância, regras de lógica *fuzzy* e relações de vizinhança.

O processo de classificação hierárquica consiste em iniciar a classificação no nível que possui menos detalhamentos, ou seja, no nível de segmentos gerado com o menor parâmetro de escala, atribuindo informações sobre as classes em seus segmentos, e ir detalhando o processo, classificando os níveis mais detalhados, onde, os segmentos que foram fusionados anteriormente herdam os atributos de seus antecessores de nível.

Observa-se, na FIGURA 20 uma representação esquemática da relação entre os resultados obtidos no processo de segmentação com as etapas do processo de classificação hierárquica, divididos por nível, onde, cada nível de escala apresentado representa uma camada de segmentos gerada de acordo com os parâmetros de escala utilizados, os quais foram apresentados anteriormente.

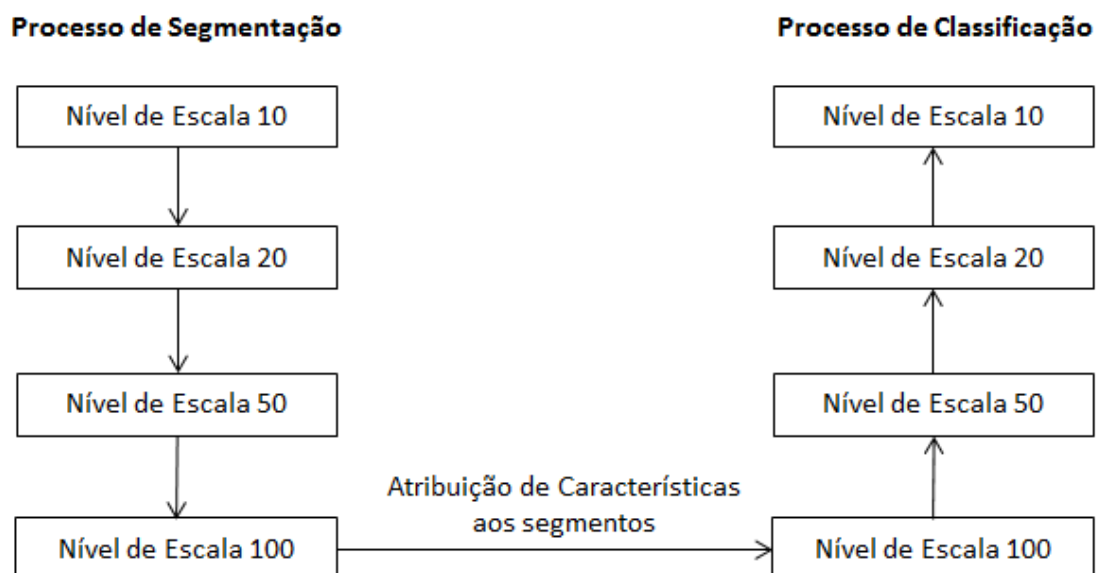


FIGURA 20. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.
FONTE: O AUTOR (2013).

O objetivo no primeiro nível do processo de classificação estipulado é diferenciar o ambiente aquático do ambiente externo ao reservatório, para isto iniciou-se o processo de classificação no “Nível de Escala 100”, onde existiam apenas duas classes a ser comparadas: “Água” e “Não Água”. Desta forma os objetos existentes no “Nível de Escala 100” receberam atribuições da classificação, as quais foram armazenadas e herdadas para que sejam utilizadas na classificação do próximo nível, permitindo assim um refinamento deste processo.

Como até o “Nível de Escala 20” foi realizada a classificação referente ao ambiente externo ao reservatório, nestes níveis intermediários a classe “Água” foi mantida, apenas herdando as características atribuídas no “Nível de Escala 100”. Desta forma no “Nível de Escala 50” tivemos a subdivisão da classe “Não Água” em duas novas classes: “Não Vegetação” e “Vegetação”. Estas duas, no “Nível de Escala 20”, foram novamente subdivididas em duas novas classes cada, sendo respectivamente: “Área Urbanizada” / “Solo Exposto” e “Vegetação Densa” / “Vegetação Rasteira”.

Na FIGURA 21 tem-se uma representação esquemática da relação semântica entre os objetos existentes entre cada um dos níveis de

detalhamento e suas respectivas classes, atribuídas a cada um destes níveis, assim como a representação da hierarquia definida para execução do processo.

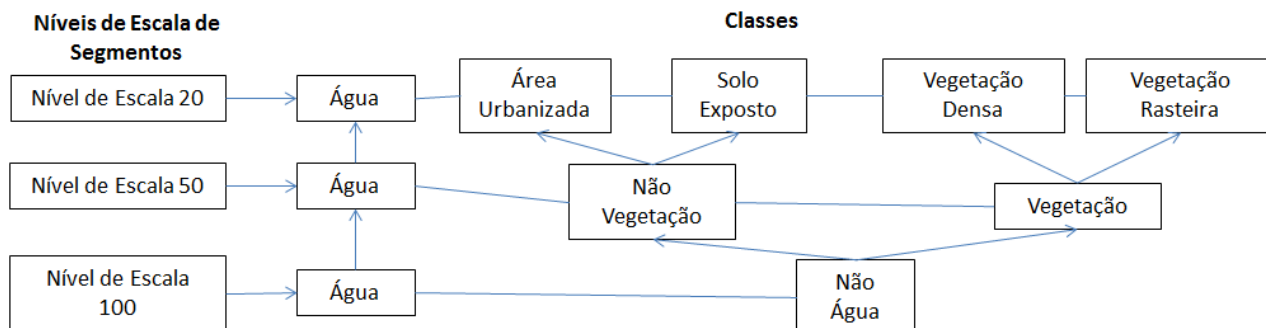


FIGURA 21. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO SEMÂNTICA ATRIBUÍDA AO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA APLICADA AO AMBIENTE EXTERNO AO RESERVATÓRIO.
FONTE: O AUTOR (2013).

Já para definir o processo de classificação do ambiente aquático, utilizou-se a hierarquia estabelecida e as informações pertinentes à classe “Água” definidas para o “Nível de Escala 20”, onde estas foram herdadas e subdivididas em seis novas classes, atribuídas aos objetos do “Nível de Escala 10”, ou seja, ao nível mais detalhado de informações geradas no processo. As seis novas classes para o ambiente aquático são: Água, Macrófitas, Erva de Jacaré, Água Turva, Baixios com solo escuro, Baixios, A FIGURA 22 apresenta uma representação esquemática da hierarquia estabelecida para a classificação do ambiente aquático do reservatório.

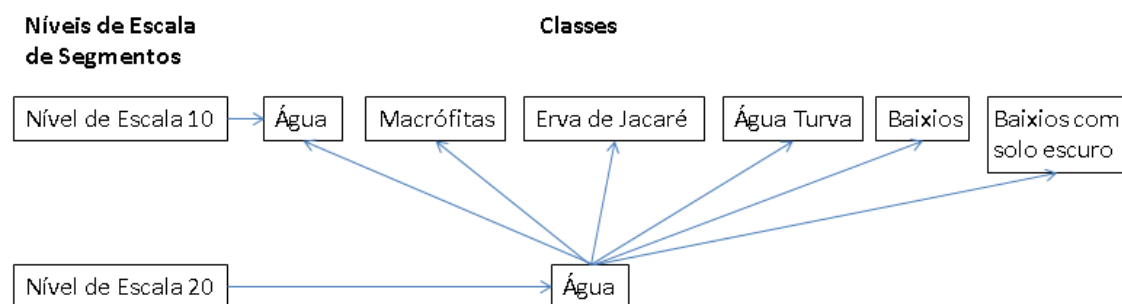


FIGURA 22. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO SEMÂNTICA ATRIBUÍDA AO PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA APLICADA AO AMBIENTE AQUÁTICO DO RESERVATÓRIO.

FONTE: O AUTOR (2013).

7.4.1. Avaliação da Qualidade Temática da Classificação

Com a conclusão do processo de classificação hierárquica é necessário fazer a avaliação da qualidade temática dos produtos cartográficos gerados no processo, os quais serão apresentados na sequência deste, pois é esta avaliação que irá determinar a confiabilidade dos mesmos para suas aplicações práticas.

Em qualquer mapa temático obtido com a aplicação de técnicas de OBIA, pode-se realizar a análise da acurácia referente à componente temática, onde se avalia a precisão da classificação das diferentes categorias que compõem o mapa desejado. Estas devem estar de acordo com a escala determinada e com o grau de generalização da informação, com o objetivo do produto cartográfico refletir a mesma realidade existente no terreno.

Desta forma, para avaliar a acurácia da classificação hierárquica da região onde está inserido o Reservatório do Iraí, foram selecionadas amostras de referência, de forma aleatória, nos níveis mais detalhados do processo de classificação, ou seja, nos níveis que possuíam o menor parâmetro de escala utilizando e consequentemente os segmentos de menor tamanho. Estas amostras consistem em segmentos classificados, ou seja, segmentos que receberam a atribuição de suas características de acordo com o estipulado durante todo o processo apresentado anteriormente, e coletados de forma a gerarem amostras significativas.

A verificação das amostras coletadas geralmente é realizada em campo, porém como as imagens utilizadas datam de agosto de 2010, e as características da região de estudos após o termino do processo já haviam se modificado em relação à época de tomada das imagens, decidiu-se realizar esta verificação utilizando técnicas de fotointerpretação da imagem original, onde as amostras foram selecionadas e classificadas manualmente de forma aleatória e posteriormente comparadas aos resultados obtidos no processo. O processo de avaliação da qualidade temática dos produtos gerados foi dividido em duas análises, uma referente ao ambiente externo ao reservatório, onde foram coletados 326 segmentos amostrais, e a outra referente ao ambiente aquático do reservatório, onde foram coletados 179 segmentos amostrais.

Sendo assim foram elaboradas as tabelas de matrizes de erros, onde se aplicou o coeficiente de concordância total e o coeficiente de concordância *Kappa*, de acordo com a seguinte formulação:

- Coeficiente de concordância total:

$$P_o = \frac{\sum X_{ii}}{N}$$

Onde:

$\sum X_{ii}$ = Somatório da diagonal principal;

N = Número total de observações;

- Coeficiente de concordância *Kappa*:

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Onde:

P_e = Somatório do produto dos elementos das linhas e colunas marginais dividido pelo número total de observações ao quadrado. (COHEN, 1960).

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1. APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

8.1.1. NDVI

O resultado obtido com o NDVI é apresentado na FIGURA 23, e na FIGURA 24, pode-se observar a aproximação em duas regiões da área de estudo.



FIGURA 23. NDVI APLICADO NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

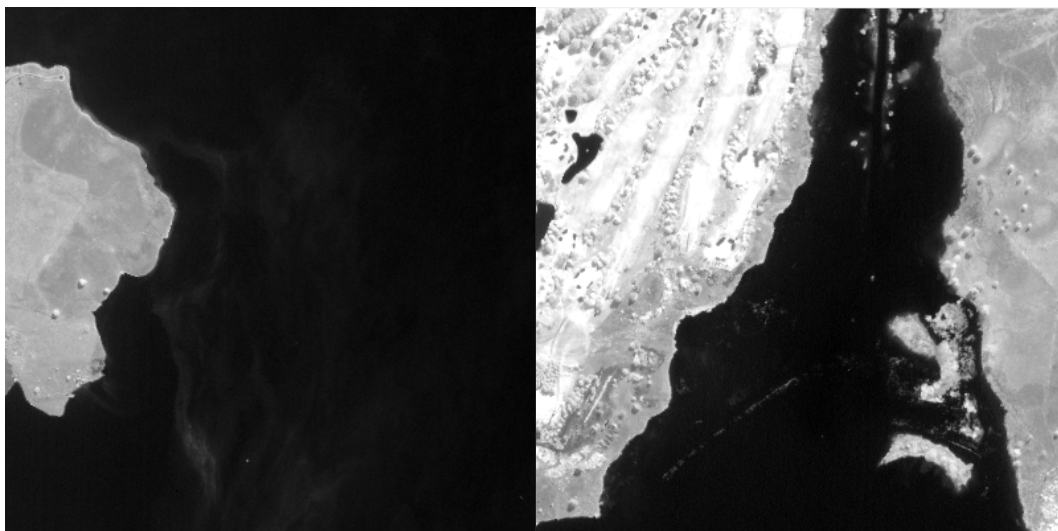


FIGURA 24. NDVI - APROXIMAÇÃO DE DUAS REGIÕES DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

8.1.2. NRAVI

O resultado obtido com o NRAVI é apresentado na **FIGURA 25**, e na **FIGURA 26** pode-se observar a aproximação em duas regiões da área de estudos.



FIGURA 25. NRAVI APLICADO NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

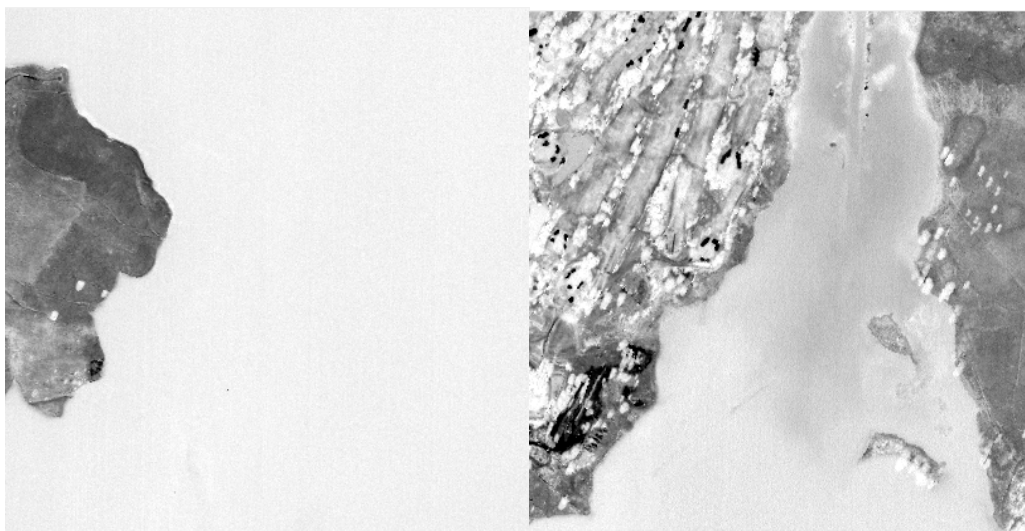


FIGURA 26. NRAVI - APROXIMAÇÃO DE DUAS REGIÕES DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

8.1.3. RAVI

O resultado obtido com o RAVI é apresentado na FIGURA 27, e na FIGURA 28 pode-se observar a aproximação em duas regiões da área de estudos.

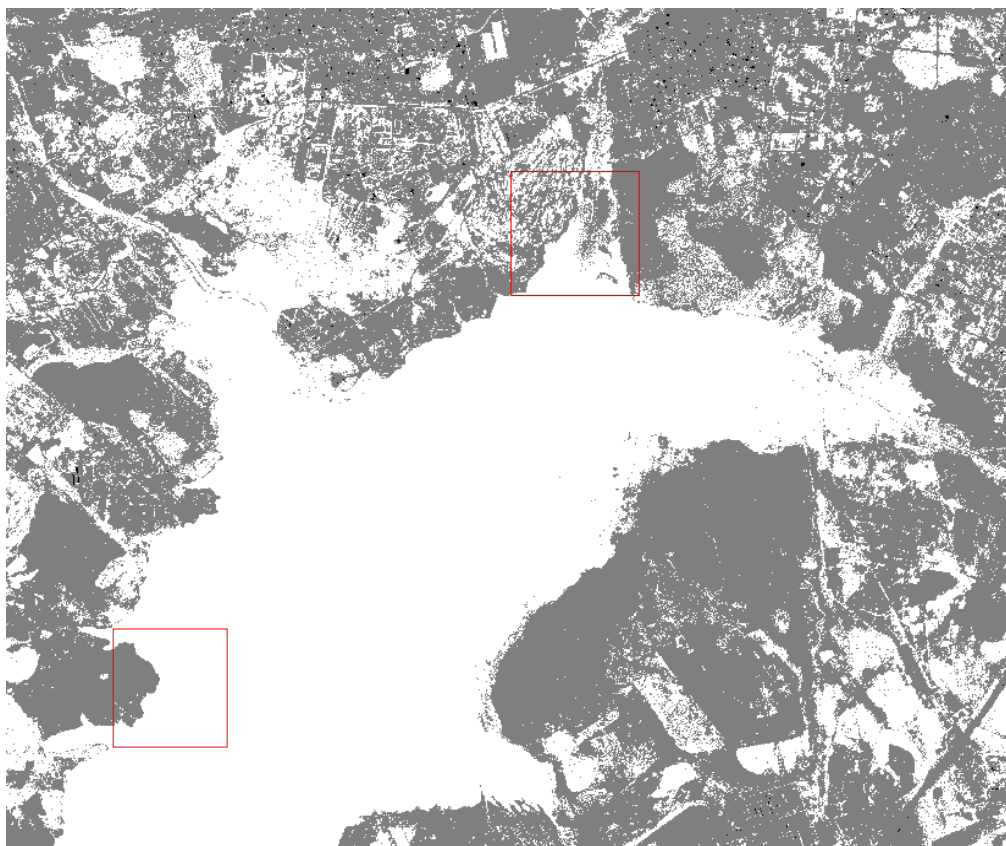


FIGURA 27. RAVI APLICADO NA REGIÃO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).



FIGURA 28. RAVI - APROXIMAÇÃO DE DUAS REGIÕES DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

8.1.4. Comparação entre os Índices de Vegetação

Na FIGURA 29, tem-se uma comparação entre os três índices, apresentados lado a lado para uma região do reservatório, aplicados sobre a imagem. Nela se pode observar a resposta gerada por cada um deles para uma mesma região em que se observa a existência de água turva, neste caso notou-se que o NDVI (direita) apresenta um resultado mais interessante, pois ressaltava esta feição de interesse no ambiente aquático, através de uma resposta espectral mais clara. Sendo assim o NDVI foi aplicado no processo de classificação do ambiente aquático para aprimorar a definição da classe “Água Turva”.

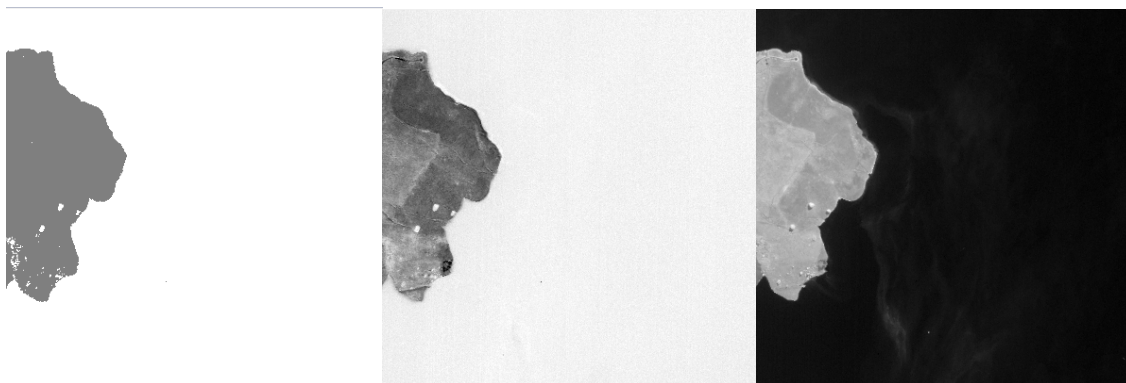


FIGURA 29. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. RAVI (ESQUERDA), NRAVI (MEIO) E NDVI (DIREITA).
FONTE: O AUTOR (2013).

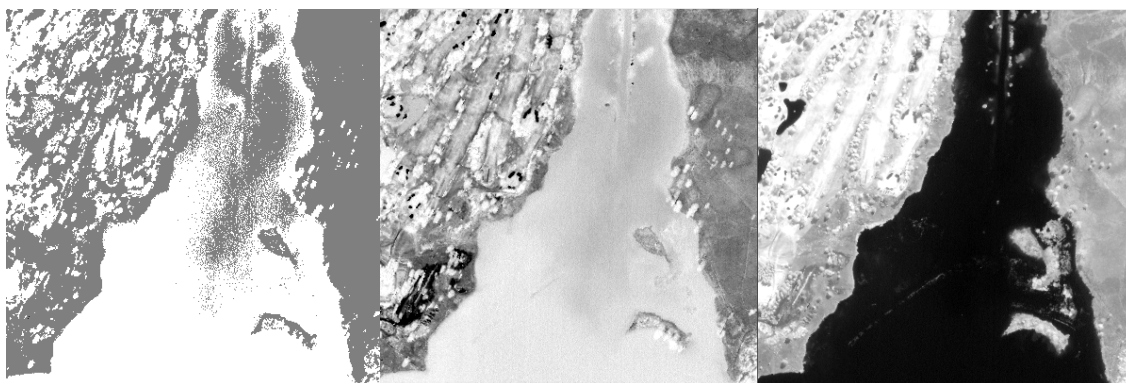


FIGURA 30. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO. RAVI (ESQUERDA), NRAVI (MEIO) E NDVI (DIREITA).
FONTE: O AUTOR (2013).

Na FIGURA 30, apresenta-se outra comparação entre os resultados gerados pelos três índices de vegetação, para outra região do reservatório, situada ao norte, onde existe um predomínio de macrófitas. Nesta comparação, pode-se observar que os dois índices de vegetação, RAVI (esquerda) e NRAVI (meio), geraram um resultado mais interessante, pois refletem melhor que o NDVI (direita) uma das classes de vegetação aquática, apresentando algumas características sobre a presença desta vegetação que não podem ser observadas no último índice citado. Este fato também pode ser observado na FIGURA 31, a qual apresenta um gráfico comparativo entre as respostas espectrais das classes água e macrófitas nos índices aplicados.

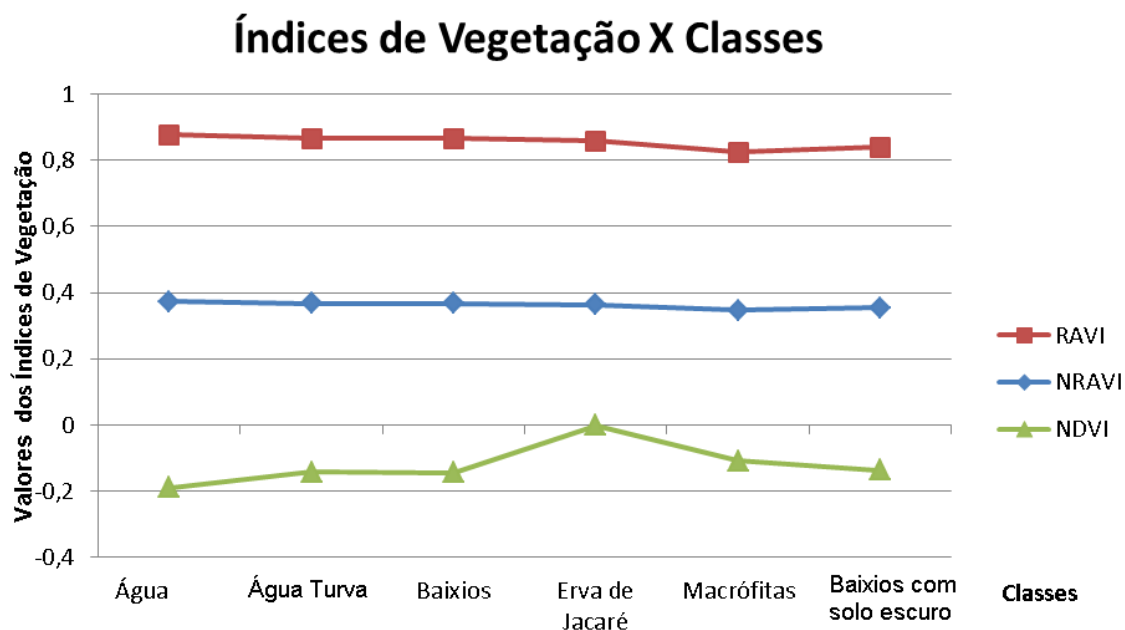


FIGURA 31. GRÁFICO DOS VALORES DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS CLASSES DEFINIDAS.
FONTE: O AUTOR (2013).

Realizando uma comparação apenas entre os dois índices de vegetação RAVI e NRAVI, os quais ressaltaram melhor as regiões com existência de macrófitas, observou-se que o RAVI possui uma caracterização mais acentuada em relação à feição de interesse, desta forma este índice foi aplicado no processo de classificação para identificação da classe macrófitas.

8.2. CLASSIFICAÇÃO HIERÁRQUICA DA IMAGEM

Com a conclusão de todas as etapas apresentadas anteriormente, os níveis hierárquicos definidos e os objetos com suas devidas propriedades atribuídas foi possível realizar o processo de classificação hierárquica da imagem baseada no modelo semântico estabelecido anteriormente.

Este processo foi dividido em duas etapas, sendo o processo de classificação do ambiente externo ao Reservatório do Iraí, ou seja, toda a

região que influencia o meio ambiente e a segunda etapa o processo de classificação do ambiente aquático do reservatório.

8.2.1. Classificação do Ambiente Externo ao Reservatório

8.2.1.1. Classificação Nível de Escala 100

O processo de classificação hierárquica iniciou-se na classificação do “Nível de Escala 100”, onde existiam apenas duas classes a serem comparadas: Água e Não Água.

Desta forma, para obter-se resultados coerentes com a realidade da região estudada e conseguir fazer essa primeira diferenciação de classes foi necessário estudar a resposta espectral das mesmas nas oito bandas multiespectrais e nos índices de vegetação adaptados, para isso utilizou-se os histogramas, conforme apresentado na FIGURA 32, onde a classe “Água” esta representada em azul e a classe “Não Água” representada em preto.

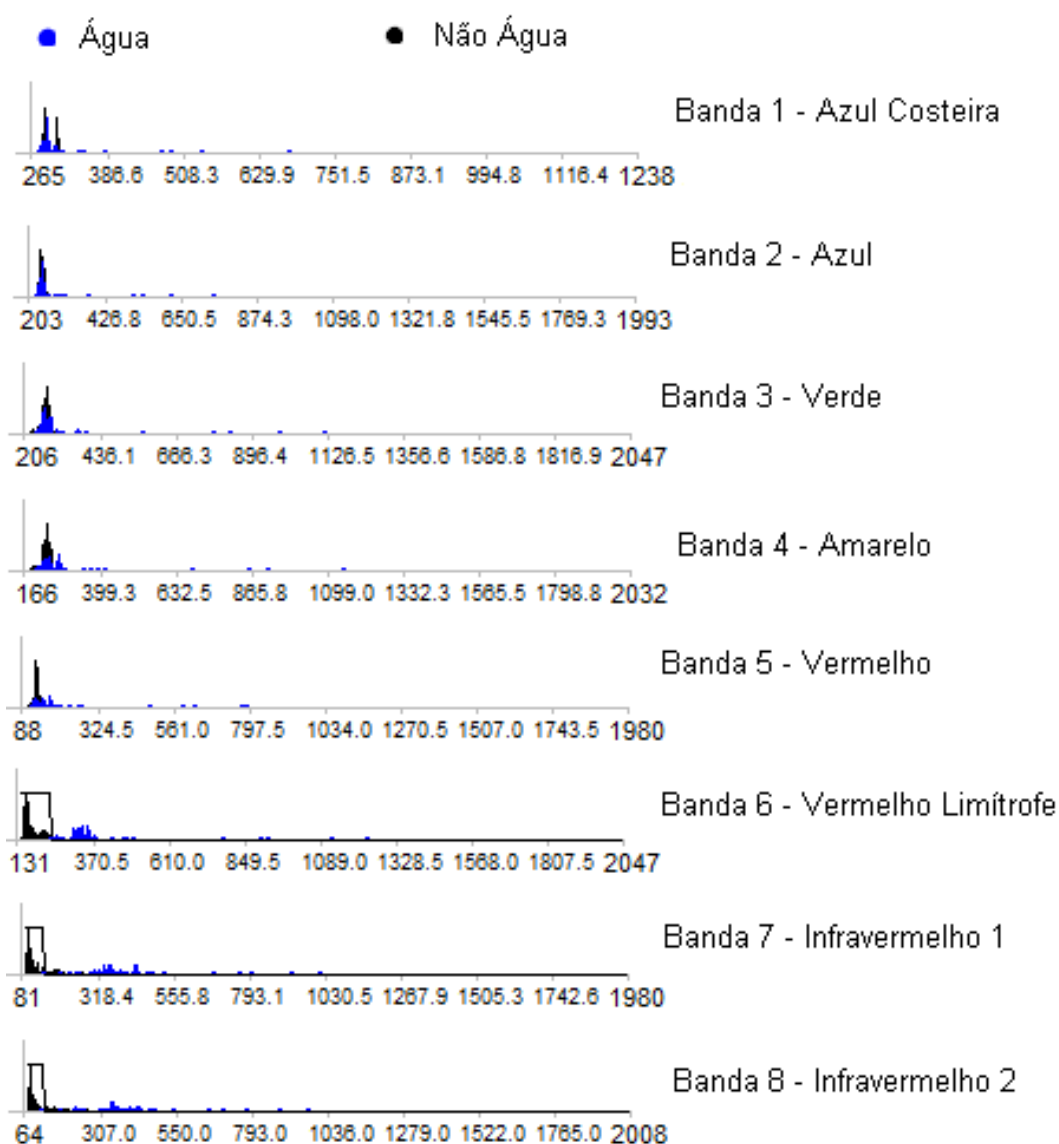


FIGURA 32. COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS NAS OITO BANDAS REFERENTES ÀS CLASSES ÁGUA E NÃO ÁGUA NO NÍVEL DE ESCALA 100.
FONTE: O AUTOR (2013).

Analisando estes histogramas foi possível identificar que as bandas 06 (vermelho limitrofe), 07 (infravermelho 1) e 08 (infravermelho 2) eram as mais apropriadas para fazer a distinção necessária, sendo assim, nestas três bandas foram aplicadas regras *fuzzy*, como pode-se observar na FIGURA 32, onde os parâmetros de cor foram analisados e definidos para cada uma delas em separado. Combinadas também com as regras de mínima distância, aplicadas nas demais bandas multiespectrais, sendo assim definiram-se os parâmetros

de cor e forma para gerar a primeira classificação da rede, a qual é apresentada na FIGURA 33.

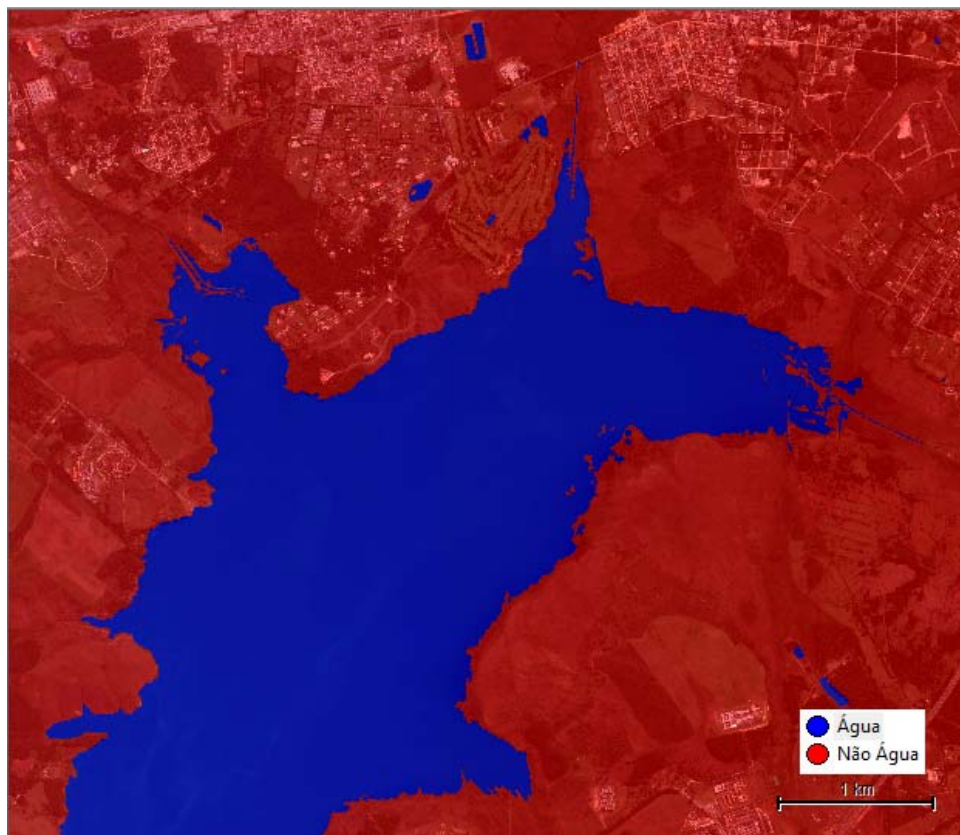


FIGURA 33. RESULTADO ELABORADO PARA REPRESENTAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO NO NÍVEL DE ESCALA 100.
FONTE: O AUTOR (2013).

8.2.1.2. Classificação Nível de Escala 50

Com a primeira classificação realizada, iniciou-se o processo hierárquico, onde as propriedades geradas no nível menos detalhado são atribuídas para o próximo nível, mais detalhado, o qual tem sua classificação aprimorada com a inserção de novas classes e novas propriedades. Nesta etapa o processo de classificação foi realizado da seguinte forma, a classe “Água” herdou as propriedades já definidas no nível anterior e a classe “Não Água” foi subdividida em duas novas classes: Vegetação e Não Vegetação.

Sendo assim, o objetivo do processo de classificação no “Nível de Escala 50” foi realizar a diferenciação das classes “Vegetação” e “Não

Vegetação”, analisando novamente os histogramas gerados para as oito bandas multiespectrais e os três índices de vegetação utilizados, os quais são apresentados nas FIGURA 34 e FIGURA 35, onde a classe “Vegetação” esta representada em azul e a classe “Não Vegetação” em preto.

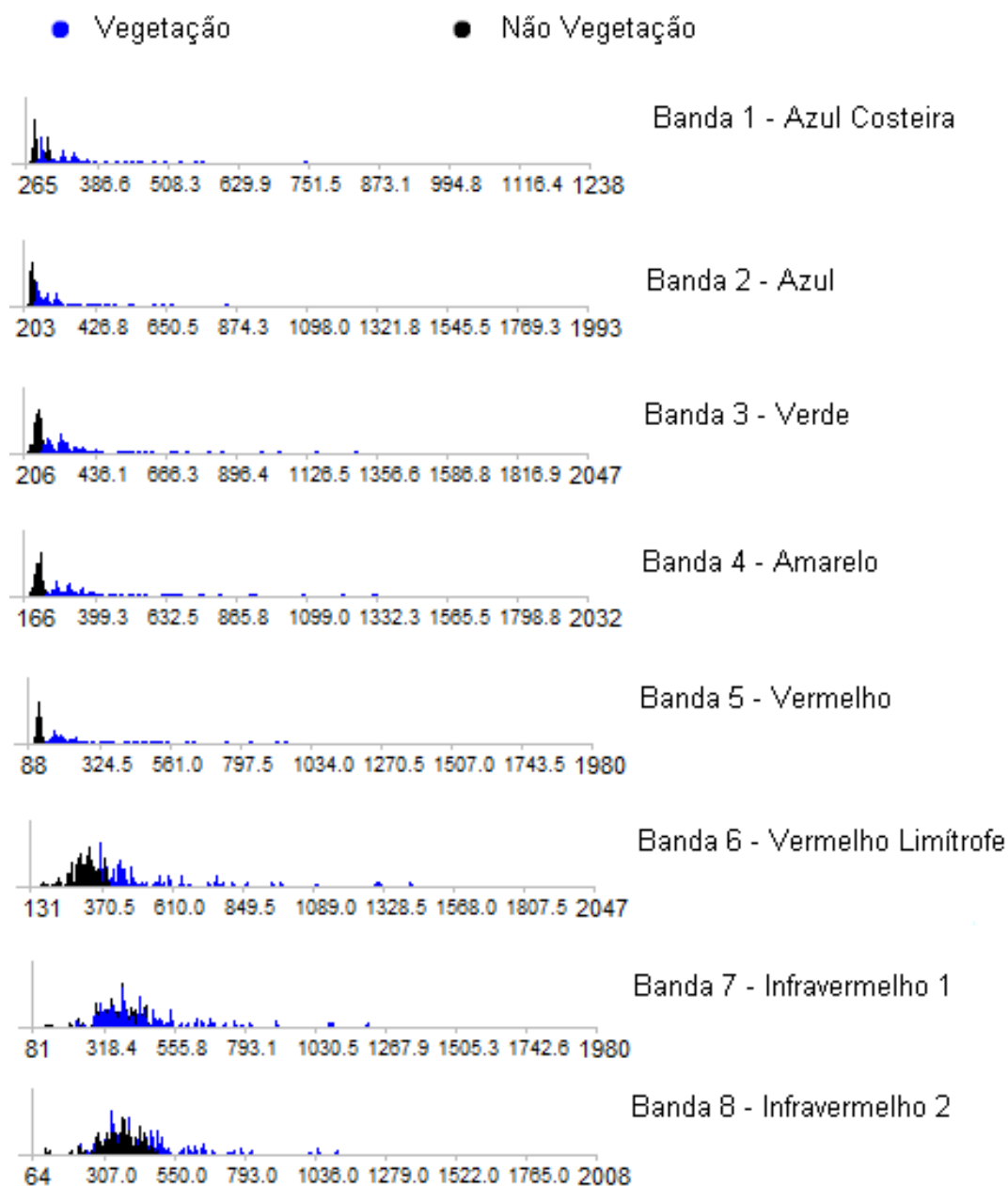


FIGURA 34. TELA DA COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS NAS OITO BANDAS REFERENTES ÀS CLASSES VEGETAÇÃO E NÃO VEGETAÇÃO NO NÍVEL 50. FONTE: O AUTOR (2013).

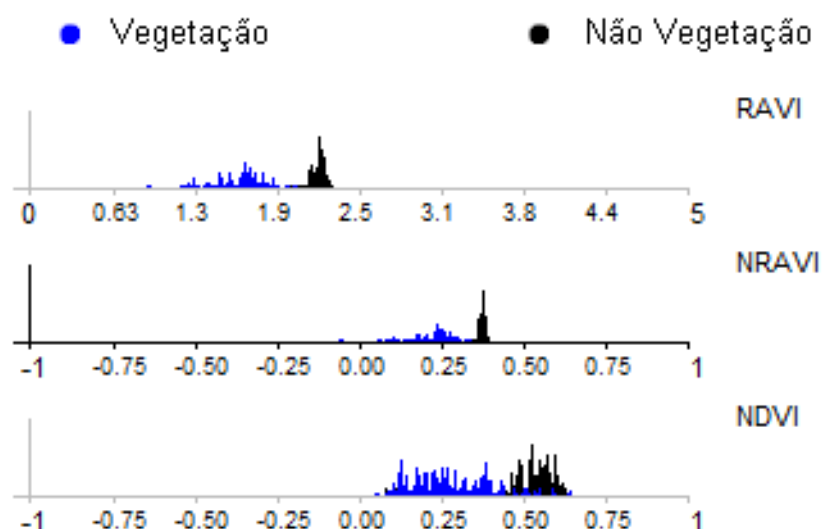


FIGURA 35. TELA DE COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS DOS ÍNDICES RAVI, NRAVI E NDVI REFERENTES ÀS CLASSES VEGETAÇÃO E NÃO VEGETAÇÃO NO NÍVEL 50.
 FONTE: O AUTOR (2013).

Como se pode observar nos histogramas, as respostas espectrais destas duas classes são muito semelhantes em diversas bandas e com o objetivo de aprimorar o processo de classificação foram inseridos nesta etapa os três índices de vegetação. Desta forma, nesta etapa do processo foram utilizadas as regras de mínima distância e as relações de vizinhança que possibilitaram a classificação do “Nível de Escala 50”, a qual é apresentada na FIGURA 36.



FIGURA 36. RESULTADO GERADO COM REPRESENTAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE ESCALA 50.

FONTE: O AUTOR (2013).

8.2.1.3. Classificação Nível de Escala 20

No “Nível de Escala 20” foi possível refinar ainda mais a classificação, transformando a classe “Não Vegetação” em duas novas classes: Solo Exposto e Área Urbanizada, e a classe “Vegetação” em: Vegetação Densa e Vegetação Rasteira. No processo continuou-se mantendo a classe “Água” com as mesmas propriedades atribuídas na classificação inicial.

Desta forma, nesta etapa foi necessário analisar os histogramas de cada uma das subdivisões das classes geradas no nível anterior, as quais também herdaram as propriedades de suas classes principais. Sendo estas análises realizadas entre as classes: “Solo Exposto” e “Área Urbanizada” e entre:

“Vegetação Densa” e “Vegetação Rasteira”. A FIGURA 37 apresenta os histogramas para a primeira comparação, onde a classe “Área Urbanizada” esta representada em azul e a classe “Solo Exposto” esta representada em preto.

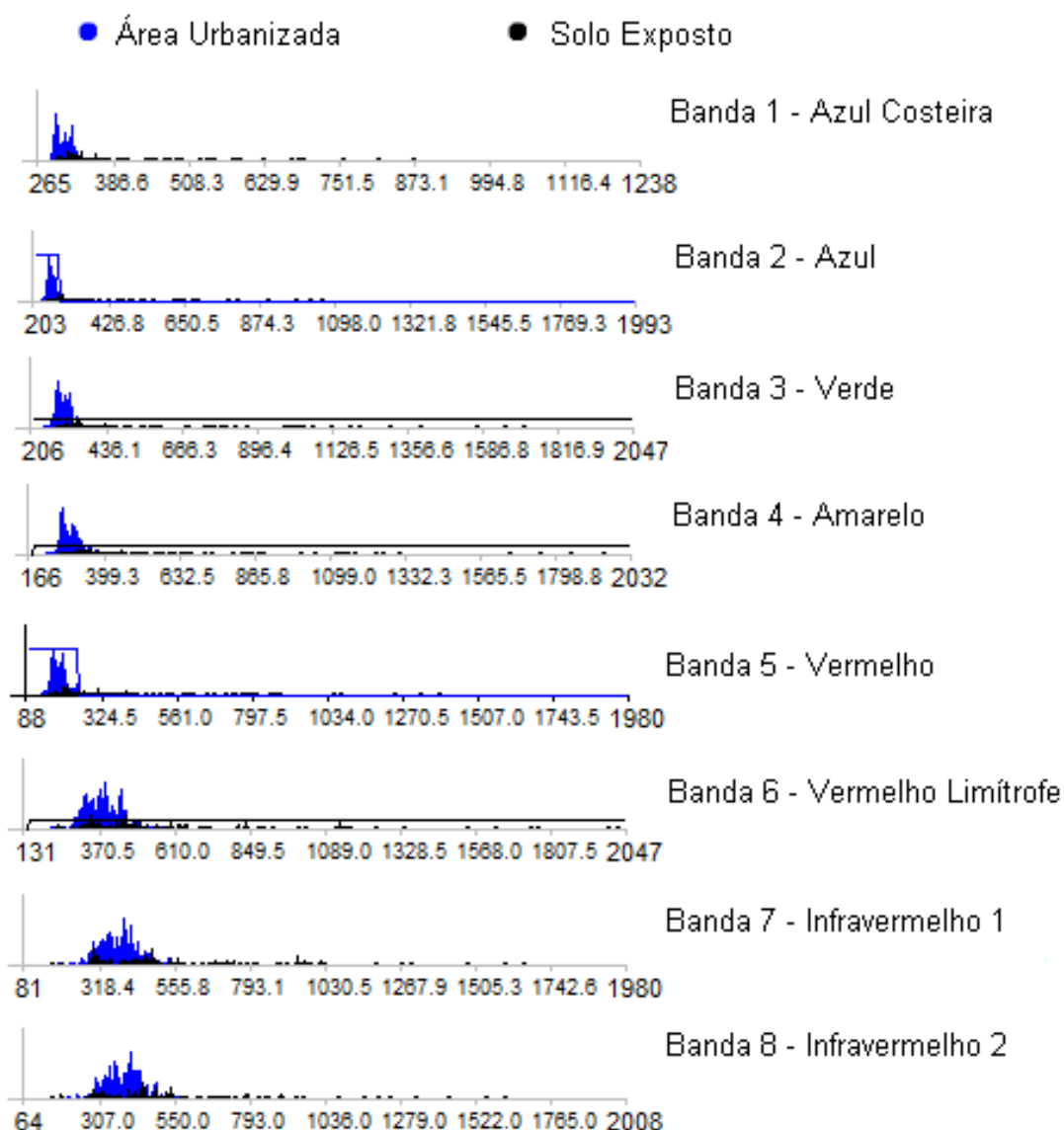


FIGURA 37. TELA DA COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS NAS OITO BANDAS REFERENTES ÀS CLASSES ÁREA URBANIZADA E SOLO EXPOSTO NO NÍVEL 20. FONTE: O AUTOR (2013).

Neste caso não foram utilizados os índices de vegetação, pois as regiões analisadas não continham nenhum tipo de vegetação, as quais já haviam sido separadas no nível de escala anterior. Para realizar a

diferenciação entre as classes “Solo Exposto” e “Área Urbanizada” foi necessário aplicar regras *fuzzy* em cinco das oito bandas multiespectrais, devido ao fato de as respostas espectrais serem muito semelhantes e gerarem confusões no momento da interpretação, mas pode-se observar um comportamento diferenciado das feições existentes nas regiões de solo exposto nas bandas 03 (verde), 04 (amarelo) e 06 (vermelho limítrofe) e nas feições existentes nas áreas urbanizadas este comportamento pode ser observado nas bandas 02 (azul) e 05 (vermelho).

Algumas características particulares da imagem utilizada também foram levadas em consideração no momento de realizar o processo de classificação, como, por exemplo, a banda amarela, a qual detecta diversos tons de amarelo e permite uma diferenciação muito eficiente entre solo exposto e telhas de cerâmica, facilitando o processo e evitando confusões.

Com a conclusão das etapas apresentadas anteriormente foi possível o primeiro resultado completo do processo de classificação hierárquica (FIGURA 38) para representar a atual situação da região entorno do Reservatório do Iraí. Este apresenta os resultados obtidos para o ambiente externo ao reservatório, representando as classes de Água, Solo Exposto, Área Urbanizada, Vegetação Rasteira e Vegetação Densa.

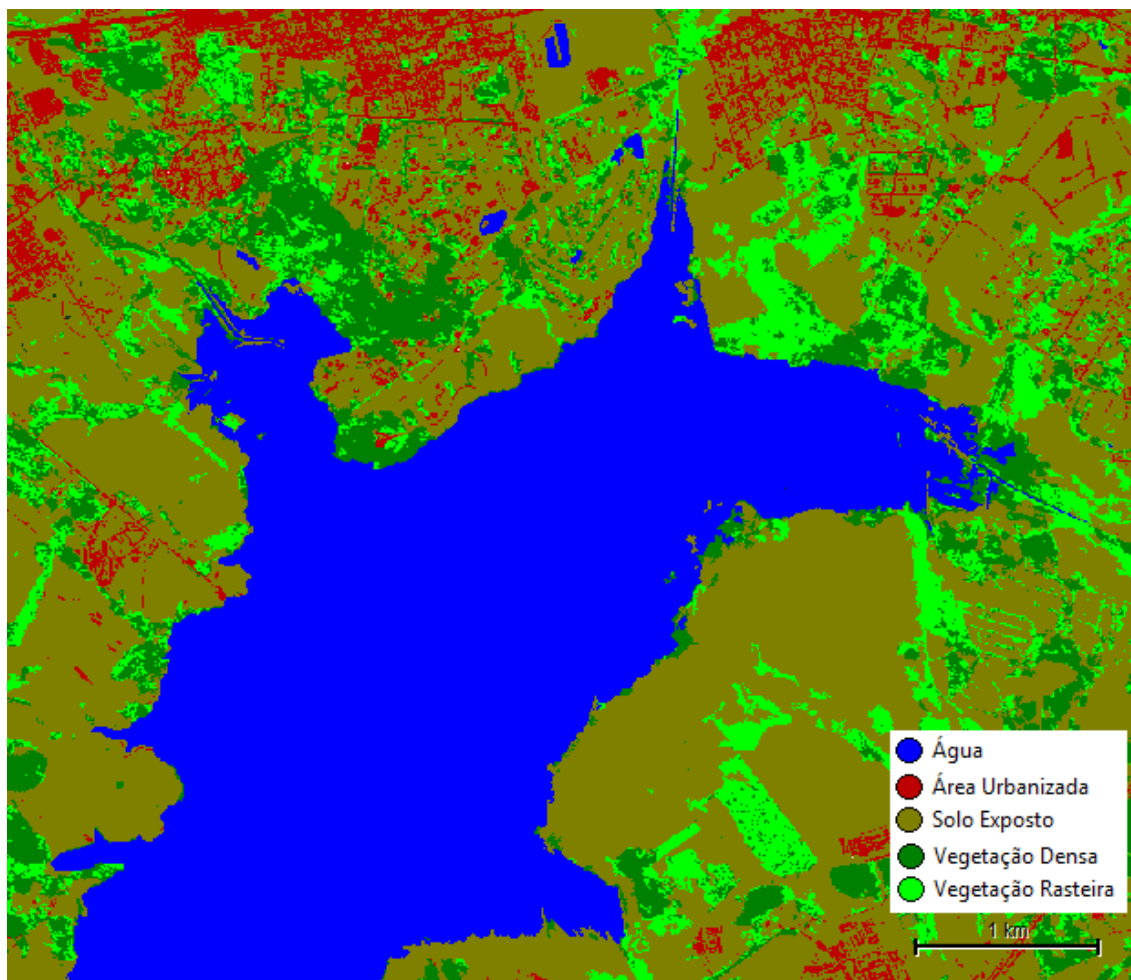


FIGURA 38. RESULTADO GERADO PARA REPRESENTAÇÃO DO AMBIENTE EXTERNO AO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

8.2.2. Classificação do Ambiente Aquático do Reservatório

Com a delimitação do ambiente aquático do reservatório, realizada no primeiro processo de classificação, foi possível herdar estas informações geradas para aprimorar a classificação da área ocupada pelo reservatório, conseguindo assim identificar e localizar os diversos tipos de vegetação aquática e as demais características particulares do local.

Esta etapa foi realizada no nível de menor parâmetro de escala, ou seja, no nível mais detalhado do processo, cujo parâmetro de escala definido é 10. Trabalhar com este nível de detalhamento permitiu gerar seis classes para o ambiente aquático do reservatório, determinadas anteriormente, as quais

tiveram suas respostas espectrais avaliadas nas oito bandas e nos três índices utilizados. Notou-se que os índices de vegetação RAVI e NDVI acentuaram a resposta de duas classes, das “Macrófitas” e “Água Turva”, respectivamente, sendo estes utilizados na parametrização do processo. Também foram utilizadas regras *fuzzy* para definição da classe de “Baixios com solo escuro” e de mínima distância e relações de vizinhança para as demais classes, aplicadas sobre as oito bandas multiespectrais.

A FIGURA 39 apresenta a comparação dos histogramas das classes “Macrófitas”, representada em azul, e “Água Turva”, representada em preto, nos três índices de vegetação utilizados, onde se percebe claramente sua diferenciação nos índices RAVI e NRAVI.

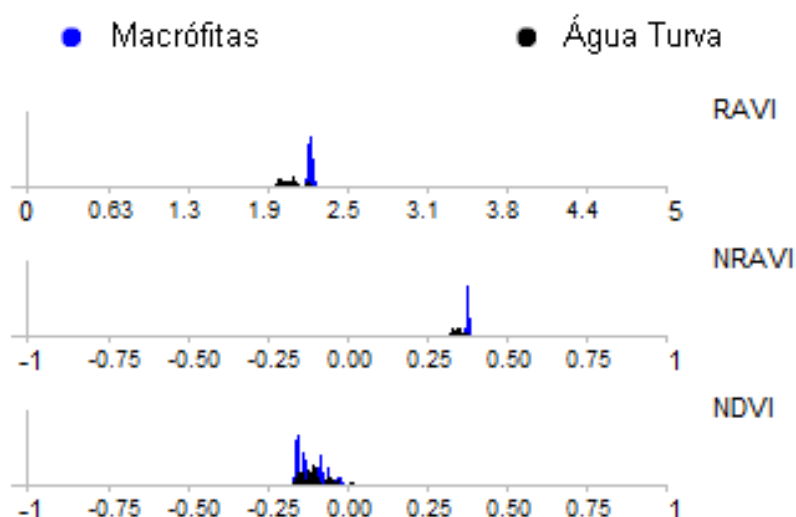


FIGURA 39. TELA DE COMPARAÇÃO DOS HISTOGRAMAS DOS ÍNDICES RAVI, NRAVI E NDVI REFERENTES ÀS CLASSES MACRÓFITAS E ÁGUA TURVA NO NÍVEL 10.

FONTE: O AUTOR (2013).

A FIGURA 40 apresenta os resultados obtidos com o processo de classificação hierárquica para o ambiente aquático, onde foi possível realizar a detecção e localização das diferentes feições existentes no ambiente aquático do Reservatório do Iraí, assim como quantificá-las. Também foi possível mapear algumas características particulares do ambiente em questão, estas são apresentadas nas seguintes classes que compõe a representação do

ambiente aquático: Água, Água Turva, Baixios, Erva de Jacaré, Macrófitas e Baixios com solo escuro.

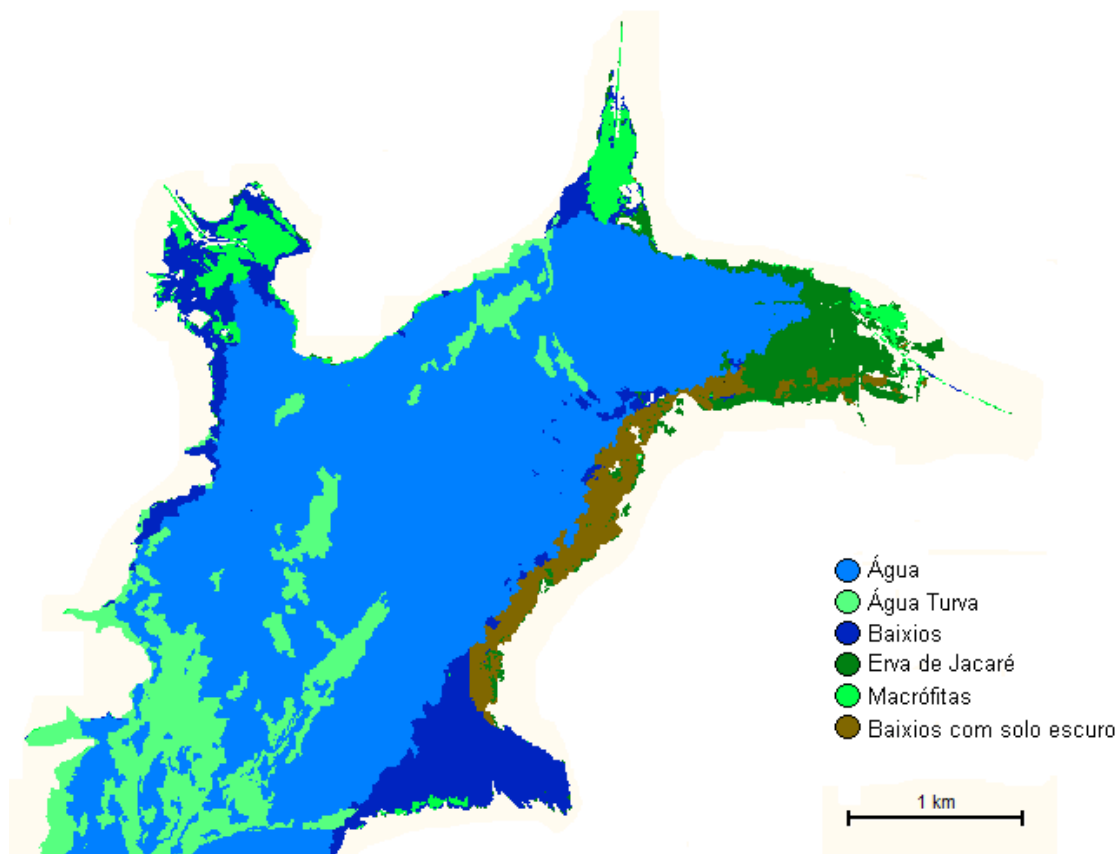


FIGURA 40. RESULTADO GERADO PARA REPRESENTAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE AQUÁTICO DO RESERVATÓRIO DO IRAÍ.
FONTE: O AUTOR (2013).

8.3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE TEMÁTICA DA CLASSIFICAÇÃO

Para análise destas amostras coletadas, foi elaborada uma matriz de erros, conhecida também como matriz de confusão, onde estes dados são apresentados de forma resumida, comparando os resultados obtidos no processo de classificação hierárquica com os resultados obtidos na fotointerpretação, ou classificação manual, em relação à imagem referência. As TABELA 6 e TABELA 7 apresentam as matrizes de erros, com o número de segmentos amostrais coletadas e seus respectivos resultados obtidos com o

processo de classificação com a utilização dos índices de vegetação para o ambiente externo ao reservatório e para o ambiente aquático, respectivamente.

TABELA 6. MATRIZ DE ERROS PARA CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE EXTERNO AO RESERVATÓRIO.

Classes	Solo Exposto	Área Urbanizada	Vegetação Densa	Vegetação Rasteira	Soma
Solo Exposto	157	18	0	0	175
Área Urbanizada	15	73	0	0	88
Vegetação Densa	0	1	38	0	39
Vegetação Rasteira	0	0	0	24	24
Soma	172	92	38	24	326

FONTE: O AUTOR (2013).

TABELA 7. MATRIZ DE ERROS PARA A CLASSIFICAÇÃO DO AMBIENTE AQUÁTICO DO RESERVATÓRIO.

Classes	Macrófitas	Erva de Jacaré	Água Turva	Baixios com solo escuro	Baixios	Água	Soma
Macrófitas	22	2	0	0	0	0	24
Erva de Jacaré	1	13	0	0	0	0	14
Água Turva	0	0	44	0	0	3	47
Baixios com solo escuro	0	0	0	20	1	0	21
Baixios	0	0	0	2	25	0	27
Água	0	0	2	0	0	44	46
Soma	23	15	46	22	26	47	179

FONTE: O AUTOR (2013).

Após a realização da avaliação da qualidade temática dos produtos cartográficos gerados através do processo de classificação hierárquica com e sem a utilização dos índices de vegetação aplicados, obtiveram-se os seguintes resultados para os dois processos, baseados nas amostragens apresentadas anteriormente, apresentados respectivamente na TABELA 8 e na TABELA 9.

TABELA 8. COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA OBTIDOS PARA AS DUAS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS COM A UTILIZAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ADAPTADOS.

Área de Estudo	Coeficiente de Concordância (%)	
	Concordância Total	<i>Kappa</i> (κ)
Ambiente Externo	89,57	83,21
Ambiente Aquático	93,85	89,83

FONTE: O AUTOR (2013).

TABELA 9. COEFICIENTES DE CONCORDÂNCIA OBTIDOS PARA AS DUAS CLASSIFICAÇÕES REALIZADAS SEM A UTILIZAÇÃO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ADAPTADOS.

Área de Estudo	Coeficiente de Concordância (%)	
	Concordância Total	<i>Kappa</i> (κ)
Ambiente Externo	83,49	78,32
Ambiente Aquático	89,33	85,91

FONTE: O AUTOR (2013).

A acurácia total do produto cartográfico elaborado, expressa pela razão entre total de pontos de referência e os pontos corretamente classificados, foi de 93,85% para a classificação realizada utilizando os índices de vegetação, conforme apresentado na TABELA 8 e de 89,33% para a classificação realizada sem os índices de vegetação. O *Kappa* total para os respectivos resultados foi 89,83% e 85,91%, sendo este coeficiente menor que a Concordância Total, pois o seu cálculo levou em consideração todos os elementos das matrizes de erros elaboradas. Como pode ser observado na TABELA 8 e na TABELA 9, os valores da acurácia total obtida para os dois coeficientes diferentes utilizados apresentam pequenas diferenças entre si, as quais podem ser desconsideradas para esta situação. No entanto, o coeficiente de concordância *Kappa* é mais consistente por envolver no valor final todas as células da matriz de erros.

A diferença significativa pode ser observada nos resultados gerados quando comparadas a utilização ou não dos índices de vegetação, ficando bem definido que os índices inseridos no processo de definição das classes gerou um produto cartográfico de qualidade superior. Apesar destas diferenças apresentadas não serem perceptíveis visualmente ao comparar os produtos temáticos elaborados, elas são significativas para as análises da qualidade dos dados digitais gerados. Desta forma os produtos cartográficos apresentados como resultados neste projeto foram elaborados utilizando os resultados obtidos com o processo de classificação hierárquica com a utilização dos índices de vegetação NDVI, RAVI e NRAVI.

9. CONCLUSÕES

Com as atividades desenvolvidas durante o projeto proposto, notou-se uma grande potencialidade da utilização de imagens WorldView-2 para definição de feições de interesse, tanto em ambientes terrestres quanto em ambientes aquáticos, através de algoritmos de segmentação multirresolução e classificação hierárquica contextualizada. O algoritmo de segmentação FNEA (presente no software eCognition Developer 8) permite a extração uma grande quantidade de parâmetros e informações, possibilitando assim a definição de diversas feições com características particulares encontradas dentro da área de estudo. As oito bandas multiespectrais contidas nas imagens permitem gerar informações complementares para a caracterização dos objetos de cada classe de interesse, como, por exemplo, a banda do amarelo utilizada para aprimorar a diferenciação entre solo exposto e telhas de cerâmica, as quais combinadas com técnicas de análise de imagem baseada em objeto – OBIA possibilitou o aprimoramento dos processos de segmentação e de classificação, permitindo a elaboração de produtos cartográficos com maior qualidade temática e confiabilidade de informações para o monitoramento das questões ambientais em regiões de lagos e reservatórios artificiais. Sendo assim, conclui-se que:

- Pode-se observar que a utilização desta metodologia como uma alternativa às questões que envolvem o monitoramento ambiental não isenta os técnicos de realizar visitas aos locais de interesse, pois é de fundamental importância uma correta interpretação das imagens utilizadas, assim como uma série de conhecimentos específicos para poder analisar as imagens e modelar os problemas existentes na região, devido ao fato da existência de feições e características particulares, as quais podem gerar algum tipo de confusão no momento da identificação e classificação das mesmas. Devido a este fato consideram-se as visitas realizadas ao Reservatório do Iraí nos meses de maio e agosto de fundamental importância para a obtenção dos resultados alcançados neste projeto, pois conhecendo a realidade do local estudado, foi possível determinar as características de cada classe de interesse com maior confiabilidade.

- A utilização dos histogramas possibilitou analisar a resposta espectral de cada classe determinada de forma individual ou combinada com outra classe, este processo foi de extrema importância para a definição correta dos parâmetros de classificação, pois classes que geravam algum tipo de confusão foram combinadas e comparadas, identificando assim suas respectivas diferenças na resposta espectral e complementando os algoritmos aplicados.

- Observou-se que a aplicação dos índices de vegetação propostos geraram resultados significativos, pois, como seu objetivo é intensificar a resposta espectral nas regiões recobertas por algum tipo de vegetação, seja aquática ou terrestre, ou regiões onde exista uma presença acentuada da característica clorofila, estas foram devidamente reconhecidas dentro do perímetro do reservatório, facilitando assim sua identificação, localização e classificação. Os resultados obtidos com a aplicação destes índices de vegetação serviram também como base no momento da definição dos parâmetros de classificação dos objetos de interesse. Desta forma, a aplicação dos índices NDVI, NRAVI e RAVI, porém adaptados à resolução espectral das imagens utilizadas, tornaram-se uma ferramenta complementar apropriada para uma boa definição das classes inerentes ao projeto, pois cada um destes índices colaborou para uma melhor definição destas, como, por exemplo, o NDVI aplicado para a classificação da classe “Água Turva”.

- Pode-se observar que os resultados obtidos com o processo de classificação hierárquica, tanto para o ambiente externo, quanto para o ambiente aquático do Reservatório do Iraí foram significativos, pois, em relação ao ambiente externo determinaram-se as regiões antropizadas e os níveis de vegetação nas áreas que influenciam diretamente o equilíbrio do meio, conforme apresentado anteriormente, sendo assim de grande valia aos técnicos responsáveis pelo monitoramento e manutenção do reservatório. Já em relação ao meio aquático, foi possível determinar todas as características da área ocupada pelo reservatório, desde a presença dos diversos tipos de vegetação aquática, áreas de baixa profundidade e outras particularidades, proporcionando aos técnicos uma visão geral do reservatório que antes não se possuía, além da possibilidade de se quantificar qualquer feição classificada.

- A aplicação do processo de avaliação da qualidade temática dos produtos gerados é de extrema importância no contexto trabalhado, pois são

estes índices de acurácia que irão determinar o sucesso do projeto desenvolvido. Neste caso obteve-se aproximadamente 89% de exatidão no produto referente ao ambiente externo ao reservatório e aproximadamente 94% de exatidão para o ambiente aquático. Estes resultados foram possíveis devido à combinação de uma série de fatores, como a utilização dos índices de vegetação adaptados, as visitas a campo para definição das classes, a utilização e aprendizado de um software novo com inúmeras funções, o domínio das técnicas de OBIA e a execução de cada etapa desenvolvida durante o projeto com atenção e dedicação, de forma minimizar ao máximo possíveis erros.

Desta forma pode-se considerar que o processo realizado gerou resultados satisfatórios e que a utilização de imagens orbitais de alta resolução espacial e espectral, combinadas com OBIA geram resultados promissores na localização e identificação de diversos tipos de vegetação aquática, podendo ser utilizadas por técnicos como ferramentas complementares ao monitoramento de grandes regiões de reservatórios de abastecimento.

Assim, após a realização de todas as etapas apresentadas anteriormente, pode-se recomendar aos interessados em continuar unindo técnicas de sensoriamento remoto com o monitoramento de questões ambientais ou com a qualidade da água em grandes reservatórios de abastecimento, a realização de um estudo mais aprofundado nas questões referentes ao processo de eutrofização, de forma a conseguir conciliar a tomada de imagens orbitais de alta resolução espacial e espectral com a coleta de amostras de água na mesma data, para assim ser possível elaborar um modelo matemático que corresponda a real interpretação dos índices de clorofila e de transparência da água, de forma a ser possível à modelagem com alto grau de confiança do IET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEPAN. (2012). **Transparência da Água - Disco de Secchi**, acesso em maio de 2012, disponível em <http://estrela-rs-aepan.blogspot.com.br>
- ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. (2005). **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados**. Curitiba: SANEPAR. FINEP.
- ANTUNES, A. F. B. (2003a). **Imagens de orbitais de alta resolução: conceitos, aplicações e como comprá-las**. *GIS Brasil*, 35.
- ANTUNES, A.F.B. (2003b). **Object oriented analysis and semantic network for high resolution image classification**. Boletim de Ciências Geodésicas. Volume nº 9.
- ANTUNES, A. F. B. (2008). **Tópicos em Sensoriamento Remoto**. Material Didático, 2008.
- BARRAGEM DO IRAÍ. (2000). **Revista Cidades do Brasil**. Junho de 2000, ed. 11, disponível em: <http://www.cidadesdobrasil.com.br/index.shtml>
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. (2000). **Mutiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multiscale image segmentation**. München. 2000.
- BLASCHKE, T.; HAY, G. J. (2001). **Object-oriented Image Analysis and Scale-space: Theory and Methods for Modeling and Evaluating Multiscale Landscape Structures**.
- BLASCHKE, T.; STROBL, J. (2001). **What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS**.
- BOLLMANN, H. A.; CARNEIRO, C.; PEGORINI, E. S.(2005). **Qualidade da Água e Dinâmica de Nutrientes**. In: ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.. **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados**. Ed. Gráfica Capital Ltda., Curitiba.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.; DE BARROS, M.; VERAS JR, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. (2002). **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. ABDR.
- CABRAL, N. R. A. J.; SOUZA, P. S. (2002). **Área de proteção ambiental: planejamento e gestão de paisagens protegidas**. Ed. RIMA, São Carlos.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.; FREITAS, U.; GARRIDO, J. (1996) **Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented, Data Modelling**. Computers and Graphics.

CARLSON, R. E. (1977). **A trophic state index for lakes**. Limnology and Oceanography. March.

COELHO, L. S.; ROCHE, K. F.; PARANHOS FILHO, A. C.; LEMOS, V. B. (2011). **Uso do Sensor CBERS/CCD na Avaliação do Estado Trófico do Reservatório Lago do Amor (Campo Grande, MS)**. Revista Brasileira de Cartografia nº 63/02.

COHEN, J. A.; **Coefficient of Agreement for Nominal Scales Educational and Psychological Measurement**. Vol XX, nº 1, p.37-46. 1960.

COUTO, J. L. V. (2012) **Limnologia**. Disponível em: <http://www.ufrj.br/> Acesso em: Maio de 2012.

DI BERNARDO, L. (1995). **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento**. Rio de Janeiro: ABES.

DIGITALGLOBE. (2012). Acesso em Abril de 2012, **DigitalGlobe Satellite Imagery and Geospatial Information Products**, disponível em <http://www.digitalglobe.com/>

DREW, D. (1983). **Processos Interativos Homem – Meio Ambiente**. Ed. Bertrand Brasil S. A. Rio de Janeiro – RJ.

ESRI. (2012). **ESRI**. Acesso em Março de 2012, disponível em **What is Arc GIS?** <http://www.esri.com/>

FERNANDES, L. F.; LAGOS, P. E. (2003). **Florações de cianobactérias e eutrofização no Reservatório do Iraí, Curitiba, PR. I: sucessão sazonal do fitoplâncton**. In: Anais do IV Seminário do Projeto Interdisciplinar sobre Eutrofização de Águas de Abastecimento Público na Bacia do Altíssimo Iguaçu, Curitiba – PR.

FERNANDES, L. F.; LAGOS, P. D.; WOSIAK, A. C.; PACHECO, C. V.; DOMINGUES, L.; ALVES, L. Z.; COQUEMALA, V. (2005). **Comunidades Fitoplanctônicas em Ambientes Lênticos**. Ed. Gráfica Capital, Curitiba – PR.

FIG. (2012). Acesso em Abril de 2012, disponível em **International Federation of Surveyors** <http://www.fig.net/>

GONÇALVES, L.; FONSECA, A. (2001). **Exploração de imagens de alta resolução do satélite Ikonos**. Comunicação apresentada ao VI Encontro de Utilizadores de Informações Geográficas.

GONZALES, R.; WOODS, R. (2000). **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Ed. Edgard Blüchner.

IBGE. (2012). **IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Acesso em Maio de 2012, disponível em <http://ibge.gov.br/home/>

INPE. (2012). **INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Acesso em Março de 2012, disponível em <http://www.dpi.inpe.br/>

ITCG. (2012). Acesso em Abril de 2012, disponível em **ITCG - Instituto de Terras, Cartografia e Geociências** <http://www.itcg.pr.gov.br/>

KERSTING, A. P. B. (2006). **Mapeamento de obstáculos sob a faixa de domínio de linhas de transmissão usando uma abordagem orientada a objeto, tecnologia LIDAR e câmara digital de pequeno formato**. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

KOK, R.; BUCK, A.; SCHNEIDER, T.; AMMER, U. (2005). **Design de projeto modular na análise orientada a objetos**. In: Sensoriamento Remoto e SIG. Novos sistemas sensores – métodos inovadores.

LUZ, N. B.; ANTUNES, A. F. B.; TAVARES JÚNIOR, J. B. (2010). **Segmentação Multirresolução e Classificação Orientada a Objetos Aplicados a Imagens Spot-5 para o Mapeamento do Uso da Terra**. Floresta, Curitiba, PR, v. 40.

NEUBERT, M. (2005). **Segment-based analysis of high resolution satellite and laser scanning data**.

PINHEIRO E. S. (2003). **Avaliação de imagens Quickbird na análise geográfica de um setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos: INPE – Pós – Graduação em Sensoriamento Remoto.

POMPÊO, M. L. M. (1999). **O disco de Secchi**. Bioikos, Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências, Departamento de Ecologia.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PINHAIS. (2012). **Prefeitura Municipal de Pinhais**. Acesso em Abril de 2012, disponível em <http://www.pinhais.pr.gov.br>

PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRAQUARA. (2012). **Prefeitura Municipal de Piraquara**. Acesso em Abril de 2012, disponível em <http://www.piraquara.pr.gov.br/>

PREFEITURA MUNICIPAL DE QUATRO BARRAS. (2000). **Lei de Zoneamento e Uso do Solo do Município de Quatro Barras**. Quatro Barras, Paraná, Brasil.

PREFEITURA MUNICIPAL DE QUATRO BARRAS. (2012). **Prefeitura Municipal de Quatro Barras**. Acesso em Maio de 2012, disponível em <http://www.quatrobarrasparana.com.br/index.php?area=home>

PROCURADORIA GERAL MUNICIPAL. (2007). **Coletânea de Leis Municipais (1ª ed.)**. Quatro Barras, Paraná: Maxigráfica.

ROCHA, A. D. (2007). **Caracterização de Áreas de Expansão Urbana Como Subsídio ao Planejamento Urbano por Meio de Técnicas de Segmentação Orientada a Objetos de Imagens Quickbird**. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

RODENACKER, K.; BENGTSSON, E. (2003). **A feature set for cytometry on digitized microscopic images**. IOS Press.

SANTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. (2005). **Dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil utilizando análise de Fourier**. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil. INPE.

SOUZA, P. R. (2010). **Estatuto da Cidade e o Plano Diretor: Instrumentos para o Cumprimento da Função Social da Propriedade**. (Disponível em: <http://www.direitodoestado.com.br/rere/edicao/21/>) *Revista Eletrônica sobre a Reforma do Estado*(Nº 21).

SPERLING, M. V. (2005). **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. SEGRAC. Imprensa Universitária de UFMG, Belo Horizonte.

TUNDISI, J. G. (2000). **Ambiente, represas e barragens**. Revista Ciência Hoje, vol. 5, Rio de Janeiro.

XAVIER, C. F.; DIAS, L. N.; BRUNKOW, R. F. (2005). **Eutrofização**. In: ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C.. *Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados*. Ed. Gráfica Capital Ltda., Curitiba.

WHITESIDE, T.; AHMAD, W. (2005). **A comparison of object-oriented and pixel based classification methods for mapping land cover in North Australia**. In: Spatial Science Institute Biennial Conference SSC2005. Spatial Intelligence, Innovation and praxis, Melbourne, Australia.